



TABLE DES MATIÈRES.



PREMIÈRE PARTIE.

Des moteurs naturels animés et inanimés.

Définitions et principes.

Pesanteurs spécifiques.

Machines en général

Frottement.

Cordes et courroies.

Machines simples.

Écoulement de l'eau.

Cours d'eau.

Tuyaux de conduite des eaux.

Moteurs hydrauliques.

Machines à élever l'eau.

Moulins à vent.

Mouvement des gaz.

Résistance des matériaux.

DEUXIÈME PARTIE.

Chaleur appliquée aux arts industriels.

Pouvoirs des corps pour la chaleur.

Évaluation des températures.

Dilatation.

Chaleur spécifique.

Chaleur latente.

Vapeurs.

Liquéfaction des gaz.

Sources de froid.

Puissances calorifiques des combustibles.

Combustibles.

Air nécessaire à la combustion.

Cheminées.

Foyers.

Chaudières à vapeur.

Distillation.

Évaporation.

Séchage.

Chauffage.

Ventilation.

Exemples d'édifices chauffés et ventilés.

Éclairage

Établissement de manufactures dites insalubres.

TROISIÈME PARTIE.

Machines à vapeur.

Machines à vapeur sans détente ni condensation.

Machines à vapeur à condensation sans détente.

QUATRIÈME PARTIE.

Chemins de fer.

CHEMINS DE FER DE PREMIER ORDRE.

Établissement de la voie.

Wagons.

Résistances au mouvement des wagons.

Machines locomotives.

Frais de construction et d'exploitation des chemins de fer.

CINQUIÈME PARTIE.

Architecture.

Ordres d'architecture.

Épaisseurs des murs.

Dimensions des différentes parties d'un édifice.

Matériaux employés dans les constructions.

Maçonneries.

Pans de bois et cloisons.

Planchers.

Enduits.

Combles.

SIXIÈME PARTIE.

Routes. Ponts. Canaux.

—

Routes.

Ponts.

Ponceaux.

Ponts en pierre

Ponts en bois.

Ponts métalliques.

Ponts suspendus.

Canaux.

Canal latéral.

Canal à point de partage.

SUPPLÉMENT.

FAUTES A CORRIGER.

Pages.	lignes.	
181	15	*pour cent d'effet utile*, mettre : *d'effet utile.*
284	17	$\int n^2 d\omega^2$, mettre : $\int n^2 d\omega$.
286	6	$\frac{v't}{L}$, mettre : $\frac{n't}{L}$.
459	2	*condensateur*, mettre : *condenseur.*

FORMULES,

TABLES ET RENSEIGNEMENTS PRATIQUES;

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

PREMIÈRE PARTIE.

Des moteurs naturels animés et inanimés.

DÉFINITIONS ET PRINCIPES.

1. *Observations.* Dans ce qui va suivre, à moins qu'on n'exprime le contraire :

Un nombre placé entre parenthèses ( ) indique un numéro d'ordre à consulter;
Un nombre précédé de *Int.* ou de *Art*, placé entre parenthèses, indique un numéro d'ordre de notre *Introduction à la science de l'ingénieur* ou de notre *Pratique de l'art de construire* à consulter ;
Les longueurs sont exprimées en mètres;
Les surfaces, en mètres carrés;
Les volumes, en mètres cubes;
Les temps, en secondes;
Les vitesses, en mètres parcourus par seconde;
Les forces, en kilogrammes;
Les quantités de travail, en kilogrammètres (32);
$\pi = 3,1415926$, ou à peu près 3,1416, ou même 3,14; c'est le rapport approché de la circonférence au diamètre (*Int.*, 603);
$g = 9,8088$ (17).

2. La propriété que possède la matière, de ne pouvoir par elle-même passer de l'état de repos à celui de mouvement ni modifier le mouvement dont elle est animée, est ce que l'on appelle son *inertie* (*Int.*, 990).

3. Une *force* est la cause quelconque qui modifie ou tend à modifier l'état de repos ou de mouvement d'un corps (*Int.*, 991).

4. Le *mouvement* d'un corps est dit *uniforme*, quand les longueurs parcourues en temps égaux quelconques sont égales.

5. Dans le mouvement uniforme, la *vitesse* est l'espace parcouru pendant l'unité de temps, ou qui serait parcouru pendant cette unité si le mouvement était suffisamment prolongé.

De cette définition et de la précédente, il résulte que la vitesse est constante pendant toute la durée du mouvement uniforme.

6. Dans le mouvement uniforme, la relation entre l'espace parcouru, la vitesse et le temps est (*Int.*, 1114)

$$E = vt, \quad \text{d'où} \quad v = \frac{E}{t} \quad \text{et} \quad t = \frac{E}{v}.$$

E espace parcouru pendant le temps t;
v vitesse (5);
t durée du mouvement.

Application. Quel est l'espace parcouru pendant 3', la vitesse étant de 4 mètres par seconde?

Faisant $v = 4$ et $t = 60 \times 3 = 180$ dans la première des formules précédentes, on a

$$E = 4 \times 180 = 720 \text{ mètres.}$$

La seconde des formules précédentes donne v quand E et t sont connus, et la troisième fournit t quand on connaît E et v.

7. Le *mouvement* d'un corps est dit *varié*, lorsqu'il n'est pas uniforme (4), c'est-à-dire quand la vitesse n'est pas constante pendant toute la durée du mouvement; alors, la relation (6) n'existe plus.

8. Le *mouvement* est dit *périodique uniforme*, lorsque le mobile parcourt certains espaces égaux dans des temps égaux, sans que la même condition soit remplie pour les parties de ces espaces.

Un de ces espaces est le chemin parcouru pendant une *période*, et le temps employé à le parcourir est la durée de la période.

Prenant la durée d'une période pour unité de temps et le chemin parcouru pendant cette unité de temps pour vitesse v, l'espace E, la vitesse v, et le temps t, qui exprime un nombre entier de durées de périodes, sont liés par les relations du n° 6.

9. *Vitesse dans le mouvement varié.* Quoique la vitesse puisse ne pas être la même à deux instants successifs du mouvement, on peut la considérer comme constante pendant une portion quelconque infiniment petite de la durée du mouvement; alors, à l'instant considéré, *la vitesse est égale à l'espace infiniment petit divisé par le temps infiniment petit employé à le parcourir*, ou bien encore, *à l'espace qui serait parcouru pendant l'unité de temps, si, à partir de l'instant considéré, le mobile se mouvait avec une vitesse constante égale à celle qu'il a acquise à cet instant* (5).

Désignant par dE l'espace infiniment petit parcouru, et par dt le temps infiniment petit employé à le parcourir, la vitesse est donc

$$v=\frac{dE}{dt}.$$

Dans la pratique, il est impossible de prendre dE et dt infiniment petits, et par suite d'avoir v exactement; mais la valeur que l'on trouvera pour cette quantité se rapprochera d'autant plus de la vérité, que dE et dt seront pris plus petits.

Traçant une courbe ayant les valeurs de t pour abscisses et celles correspondantes de E pour ordonnées, la valeur de v après un temps t est donnée par la tangente trigonométrique de l'angle que forme avec l'axe des t la tangente menée à la courbe au point correspondant à t (*Int.*, 857).

10. *Variation de la vitesse dans le mouvement varié.* v étant la vitesse du mobile après le temps t, après le temps t plus le temps infiniment petit ou *instant* dt, elle augmente ou diminue d'une quantité infiniment petite dv, et devient $v \pm dv$.

dv étant la variation de la vitesse pendant le temps dt, la variation moyenne est, pour l'unité de temps, pendant le temps dt,

$$dv \times \frac{1}{dt}=\frac{dv}{dt}.$$

Cette valeur est la quantité dont varierait la vitesse pendant l'unité de temps qui succéderait à t, si, pour chaque instant dt de cette unité, l'augmentation de la vitesse était constante et égale à dv.

$\frac{dv}{dt}$, que nous représenterons par j, s'appelle l'*accélération de vitesse pendant l'unité de temps*, ou simplement l'*accélération de vitesse* à l'instant considéré, c'est-à-dire à l'instant qui succède au temps t.

Les tangentes à une courbe ayant les valeurs de t pour abscisses et celles correspondantes de v pour ordonnées fournissent les valeurs de j, comme les tangentes à la courbe du n° 9 donnent celles de v.

11. Lorsque la vitesse v et l'accélération j sont de même signe, c'est-à-dire à la fois toutes deux positives ou toutes deux négatives, le *mouvement* est *accéléré*, dans le sens vulgaire de ce mot; si, au contraire, ces deux quantités sont de signes différents, le *mouvement* est *retardé.*

12. Lorsque l'accélération j est constante, le *mouvement* est dit *uniformément varié.*

13. *Expression de la vitesse dans le mouvement uniformément varié* (*Int.*, 1122). v_0 étant la *vitesse initiale*, c'est-à-dire la vitesse du mobile au commencement du temps t, après ce temps, le mobile possédera une vitesse

$$v=v_0 \pm jt.$$

Considérant une origine sur la ligne que suit le mobile, v_0 est positif ou négatif, suivant son sens, et on a, en définitive (*Int.*, 1115),

$$v = \pm v_0 \pm jt.$$

Si le corps part du repos, on a $v_0 = 0$, et, alors, après le temps t, la vitesse est

$$v = \pm jt, \quad \text{d'où} \quad j = \pm \frac{v}{t} \quad \text{et} \quad t = \frac{v}{j}.$$

On peut de même tirer les valeurs de j et de t de chacune des deux formules précédentes, et on voit que dans tous les cas *j est égal à la variation de la vitesse pendant le temps t, divisée par ce temps.*

14. *Expression de l'espace parcouru dans le mouvement uniformément varié* (*Int.*, 1123).

1° Le mouvement étant uniformément accéléré, on a

$$E = v_0 t + \frac{1}{2} jt^2 :$$

E espace parcouru pendant le temps t ;
t temps pendant lequel on considère le mouvement ;
v_0 vitesse initiale ;
j accélération de vitesse (11).

2° Quand le mouvement est uniformément retardé, la quantité $\frac{1}{2} jt^2$ est négative, et, après le temps t, on a

$$E = v_0 t - \frac{1}{2} jt^2.$$

3° Si au commencement du temps t le mobile avait déjà parcouru l'espace E_0, après ce temps t l'espace total parcouru serait

$$E = E_0 + v_0 t + \frac{1}{2} jt^2.$$

4° Dans le cas où la vitesse initiale $v_0 = 0$, la formule 1° devient

$$E = \frac{1}{2} jt^2. \qquad (a)$$

Remplaçant j par sa valeur en fonction de v (13), on a aussi

$$E = \frac{1}{2} vt.$$

5° Pour $t = 1$, la formule (a) devient

$$E = \frac{1}{2} j.$$

Ainsi, *le corps partant du repos, l'espace parcouru pendant la première unité de temps du mouvement est la moitié de la vitesse acquise à la fin de cette unité*, c'est-à-dire *la moitié de l'espace que parcourrait le mobile pendant la deuxième unité de temps du mouvement, s'il se mouvait d'une manière uniforme avec la vitesse acquise à la fin de la première unité.*

Comme on peut prendre un temps arbitraire pour unité de temps, il en résulte qu'après un temps quelconque, la vitesse acquise, c'est-à-dire l'espace qui serait parcouru d'un mouvement uniforme pendant un temps égal à celui pris pour unité, serait double du chemin qui a été parcouru pendant ce temps.

Remarque. Prenant une origine sur la ligne que suit le mobile, la distance à laquelle ce mobile se trouve du point fixe est, dans tous les cas que nous venons d'examiner, représentée par la formule générale

$$E = \pm E_0 \pm v_0 t \pm \frac{1}{2} j t^2. \qquad (Int., 1115.)$$

15. L'action continue d'une force constante sur un corps produit un mouvement uniformément varié (*Int.*, 1124). Ainsi lorsqu'un corps possède un mouvement uniforme, c'est qu'il n'est sollicité par aucune force, ou que les forces qui le sollicitent se font équilibre entre elles (*Int.*, 1125).

16. *Le poids d'un corps* est la résultante des actions de la pesanteur sur toutes les molécules de ce corps.

La force due à la pesanteur étant la même pour toutes les molécules, le poids d'un corps est donc proportionnel au nombre des molécules ou à la quantité de matière que contient ce corps.

L'action de la pesanteur variant avec la distance au centre de la terre, le poids d'un même corps varie de la même manière. Ainsi un fil qui suspendrait un même corps près de la surface de la terre et dans les régions élevées, serait soumis à une plus grande tension dans le premier cas que dans le second.

17. *Application des formules du mouvement uniformément varié au cas de la pesanteur.* Le poids d'un corps étant, dans les limites de nos observations, une force à très-peu près constante qui agit d'uue manière permanente sur le corps, il en résulte que si ce corps n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur, il devra prendre dans le vide un mouvement uniformément accéléré (11). C'est en effet ce que vérifie l'expérience, qui a de plus fait voir que l'accélération de vitesse j, qu'on a l'habitude de représenter par g lorsqu'il s'agit de la pesanteur, était, à l'Observatoire de Paris, égale à $9^m,8088$ par seconde; dans la pratique on fait ordinairement $g = 9^m,81$.

Lorsque le corps se meut dans l'air, il éprouve, pour déplacer ce gaz, une résistance qui diminue son mouvement. Mais lorsque la vitesse du corps n'est pas considérable, et que sa section est faible par rapport à

son poids, on peut supposer, dans les cas ordinaires de la chute des corps, qu'il se meut, sans erreur sensible, dans l'air comme dans le vide.

Les formules du mouvement uniformément varié sont, pour le cas de la pesanteur :

1° $$v = \pm v_0 \pm gt; \quad (13)$$

2° $$E = \pm E_0 \pm v_0 t \pm \frac{1}{2} g t^2. \quad (14)$$

Faisant $E_0 = 0$, $v_0 = 0$ et $t = 1''$, cette dernière formule devient

$$E = \frac{1}{2} g = 4^m,9044.$$

Ce qui fait voir que l'espace parcouru pendant la première seconde du mouvement par un corps qui tombe dans le vide, en partant du repos, est égal à $4^m\,9044$, moitié de la vitesse acquise après ce temps.

18. *Application de ces formules à la chute des corps.*

La vitesse initiale v_0 étant nulle, c'est-à-dire le corps partant du repos, et $t = 5''$ étant la durée de la descente, la vitesse acquise après ce temps est

$$v = gt = 9,8088 \times 5 = 49^m,044. \quad (a)$$

Pour savoir quelle doit être la durée de la chute pour que le mobile acquière une vitesse déterminée $v = 49^m,044$, on remarque que la formule (*a*) donne

$$t = \frac{v}{g} = \frac{49.044}{9,8088} = 5''. \quad (a')$$

Supposant $E_0 = 0$, h étant l'espace parcouru, c'est-à-dire, la hauteur de laquelle le corps est tombé après un temps $t = 5''$, on a (4°, 14)

$$h = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} \times 9,8088 \times 5^2 = 122^m,61. \quad (b)$$

Pour avoir le temps que mettra un corps à tomber d'une hauteur $h = 122^m,61$, de la formule (*b*) on tire

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 122,61}{9,8088}} = 5''. \quad (b')$$

Pour avoir la vitesse qu'acquiert un corps en tombant d'une hauteur donnée $122^m,61$, on remplace dans la formule (*a*) t par sa valeur (*b'*), ce qui donne

$$v = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,8088 \times 122,61} = 49^m,044. \quad (c)$$

Pour avoir la hauteur de laquelle doit tomber un corps pour acquérir

une vitesse donnée $v=49^m,044$ par seconde, de la formule (c) on tire

$$h=\frac{v^2}{2g}=\frac{49,044^2}{2\times 9,8088}=122^m,61. \qquad (c')$$

Ces formules, qui sont d'un usage continuel en mécanique, donnent : (a), la vitesse en fonction du temps; (a'), le temps en fonction de la vitesse; (b), la hauteur de chute en fonction du temps; (b'), le temps en fonction de la hauteur de chute; (c), la vitesse en fonction de la hauteur de chute; (c'), la hauteur de chute en fonction de la vitesse.

Ces formules sont données pour le cas de la pesanteur; mais des formules des nos 13 et 14 on en peut tirer de tout à fait analogues pour un mouvement uniformément varié quelconque. Nous avons préféré, sans double emploi, donner celles dues à la pesanteur, qui sont d'un usage plus fréquent dans la pratique.

19. Le poids P d'un corps (16) divisé par g (17) est la *masse* de ce corps.

P et g variant dans le même rapport, la masse $\frac{P}{g}$ d'un corps est la même dans tous les lieux. Comme la quantité de matière d'un même corps est aussi constante quel que soit le lieu qu'il occupe, la masse donne donc une idée exacte de la quantité de matière, et peut lui servir de mesure (21 et 22). C'est ce qui explique pourquoi on a dit longtemps que la masse d'un corps était la quantité de matière de ce corps.

20. *Relations entre les masses, les forces et les vitesses* (*Int.*, 1128 et suivants). On dit que deux *forces* sont *égales*, lorsqu'elles sont capables d'imprimer le même mouvement à une même masse, et que deux *masses* sont *égales*, lorsque deux forces égales leur impriment le même mouvement. De là on conclut :

1° Que, *pour une même accélération de vitesse* (10), *les forces sont proportionnelles aux masses;* ainsi on a

$$F:f::M:m.$$

F l'une des forces;
f l'autre force;
M masse sollicitée par la force F;
m masse sollicitée par la force f;

2° Que, *pour une même masse, les forces sont proportionnelles aux accélérations de vitesse;* ainsi on a

$$F:f::J:j.$$

J accélération de vitesse due à la force F;
j *id.* *id.* f.

Supposant les masses parties du repos, $V=Jt$ et $v=jt$ étant les

vitesses acquises après le même temps t (13), on a $V : v :: J : j$, et, par suite,

$$F : f :: V : v.$$

Ce qui fait voir que *les forces sont aussi entre elles comme les vitesses qu'elles communiquent à la même masse dans le même temps.*

3° Que *deux forces quelconques sont entre elles comme les produits des masses* M *et* m *qu'elles sollicitent par les accélérations de vitesse qu'elles leur communiquent;* ainsi on a

$$F : f :: MJ : mj, \qquad (a)$$

ou encore, à cause de la proportion $V : v :: J : j$,

$$F : f :: MV : mv.$$

Ce qui fait voir que *les forces sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses.*

21. Appelant *unité de masse*, la masse qui prend l'unité d'accélération de vitesse dans l'unité de temps quand elle est sollicitée par l'*unité de force*, il en résulte que si dans la proportion (a) (20) on fait $f = 1$ et $j = 1$, d'où $m = 1$ et $mj = 1$, on en conclut

$$F = MJ.$$

Ce qui fait voir que *l'intensité d'une force quelconque est représentée par le produit de la masse par l'accélération de vitesse qu'elle communique à cette masse dans l'unité de temps.*

De la formule précédente on tire

$$M = \frac{F}{J} \quad \text{et} \quad J = \frac{F}{M}.$$

Résultats faciles à énoncer verbalement.

22. Si la force F est le poids P d'un corps dont la masse est M, $g = 9^{m},8088$ étant l'accélération de vitesse (17), les trois formules précédentes deviennent respectivement

$$P = Mg, \quad M = \frac{P}{g} \quad \text{et} \quad g = \frac{P}{M}.$$

Ces nouvelles formules font voir :

1° *Que le poids d'un corps est égal à la masse multipliée par l'accélération* g *due à sa pesanteur.*

Pour $\qquad M = 1, \quad$ on a $\quad P = g = 9^{k},8088.$

Ce qui fait voir que *le poids d'un corps dont la masse est égale à l'unité est* $9^{k},8088$;

2° *Que la masse est égale au poids divisé par* g.

Pour $P = 1$, on a $M = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,8088} = 0,102$.

Ce qui fait voir que *la masse d'un corps du poids de* 1 kil. *est* 0,102;

3° *Que l'accélération* g *due à la pesanteur est égale au poids du corps divisé par sa masse.*

23. Deux forces étant entre elles comme les accélérations qu'elles communiquent à une même masse (20), l'une des forces étant le poids de la masse, on a

$$F : P :: J : g. \qquad (a)$$

Proportion qui donne l'accélération J qu'une force quelconque communique par seconde à une masse quelconque $M = \frac{P}{g}$ d'un poids donné P.

Pour $F = 10^k$, et $P = 25^k$, cette proportion devient

$$10 : 25 :: J : 9,8088, \quad \text{d'où} \quad J = \frac{10 \times 9,8088}{25} = 3^m,9235.$$

Comme la vitesse, après un temps quelconque t, est Jt (13), ayant l'accélération J, *on peut donc déterminer quelle vitesse une force connue aura communiquée à une masse déterminée après un temps donné.* Pour $t = 8''$, on aura

$$v = 3,9235 \times 8 = 31^m,388.$$

La proportion (a) *donne aussi la force* F *qu'il faut appliquer à une masse* $\frac{P}{g}$, *pour lui communiquer une vitesse donnée* v *après un certain temps* t.

Pour les données précédentes, on a d'abord

$$J = \frac{v}{t} = \frac{31,388}{8} = 3^m,9235;$$

puis la proportion devient

$$F : 25 :: 3,9235 : 9,8088, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{25 \times 3,9235}{9,8088} = 10^k.$$

24. L'*impulsion d'une force* est le produit de son intensité par la durée de son action.

Ainsi une force de 12^k agissant sur un corps pendant 8" produit une impulsion représentée par $12 \times 8 = 96$.

25. Le produit mv de la masse m d'un corps par la vitesse v qu'il possède prend le nom de *quantité de mouvement*.

Le poids d'un corps étant 50^k, d'où il résulte que sa masse est (22)

$\frac{1}{g} \times P = 0{,}102 \times 50 = 5{,}10$, et la vitesse qu'il possède étant de 30^m, sa quantité de mouvement est représentée par

$$mv = 5{,}10 \times 30 = 153.$$

26. *Égalité entre l'impulsion et la quantité de mouvement.*

Lorsque le mouvement est uniformément accéléré, on a (13), en remarquant que l'accélération $j = \frac{F}{m}$ (21),

$$v = v_0 + \frac{F}{m}\, t,$$

d'où on tire

$$Ft = mv - mv_0. \qquad (a)$$

Ft est l'impulsion, elle a le signe de F; mv est la quantité de mouvement après le temps t, et mv_0 est la quantité de mouvement au commencement du temps t; ces quantités de mouvement ont respectivement les signes de v et v_0.

La formule (*a*) fait voir que *l'impulsion et la différence des quantités de mouvement sont toujours égales et de même signe.* Ce que l'on peut énoncer en disant que *l'impulsion est toujours égale au gain ou à la perte de quantité de mouvement.*

Considérant toujours la vitesse initiale v, comme positive, il y aura gain de quantité de mouvement lorsque la force F sera positive, c'est-à-dire lorsqu'elle agira dans le sens de v_0, et perte lorsqu'elle sera negative (*Int.*, 1139).

Lorsque $v_0 = 0$, c'est-à-dire lorsque le corps part du repos, la formule (*a*) devient

$$Ft = mv.$$

Ce qui fait voir encore plus simplement que *l'impulsion d'une force est égale à la quantité de mouvement que cette force imprime au corps qu'elle sollicite pendant la durée de son impulsion.*

Trois quelconques des quatre quantités F, t, m, v étant connues, l'équation $Ft = mv$ donne la quatrième.

1er exemple. *Trouver la force* F *capable de réduire au repos, en* 5'', *un corps dont le poids est* 50^k, *ce corps étant animé d'une vitesse de* 15^m *par seconde.*

Substituant ces nombres dans la formule, elle devient

$$F \times 5 = 0{,}102 \times 50 \times 15, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{0{,}102 \times 50 \times 15}{5} = 15^k{,}30.$$

2e exemple. *Trouver le temps que mettra une force de* $15^k{,}30$ *pour*

réduire au repos un corps du poids de 50^k *animé d'une vitesse de* 15^m *par seconde.*

Ces nombres, substitués dans la formule, donnent

$$15,30 \times t = 0,102 \times 50 \times 15, \quad \text{d'où} \quad t = \frac{0,102 \times 50 \times 15}{15,30} = 5''.$$

27. *Le travail d'une force se représente par le produit de l'intensité de la force par la projection, sur la direction de la force, de l'espace parcouru par le point d'application* Ce produit a été appelé *quantité d'action* par quelques auteurs. Ainsi on a, en représentant par $\mathcal{T}$ ce travail,

$$\mathcal{T} = F \times E \cos \alpha; \qquad (a)$$

$\mathcal{T}$ travail produit;
F intensité de la force;
E espace parcouru par le point d'application;
α angle que fait la direction de la force avec celle de l'espace parcouru (*Int.*, 826).

Quand $\alpha = 0$, c'est-à-dire quand le point d'application se meut dans la direction de la force, on a

$$\cos \alpha = 1, \quad \text{et, par suite,} \quad \mathcal{T} = F \times E.$$

Ainsi, dans ce cas, *le travail est représenté par le produit de la force par l'espace parcouru.*

Intervertissant l'ordre des facteurs dans le second membre de l'équation (*a*), on a

$$\mathcal{T} = E \times F \cos \alpha.$$

Ce qui fait voir que *le travail est aussi représenté par l'espace parcouru* E *multiplié par la projection* F $\cos \alpha$ *de la force sur la direction de cet espace* (*Int.*, 1141 et suivants).

28. La moitié $\frac{1}{2} mv^2$ du produit de la masse m d'un corps par le carré v^2 de la vitesse qu'il possède prend le nom de *puissance vive*. Des auteurs l'appellent *force vive*, nom que quelques-uns donnent au produit mv^2.

29. Dans le mouvement uniformément accéléré on a (13 et 14), en faisant $j = \frac{F}{m}$ (21),

$$v = v_0 + \frac{F}{m} t, \quad \text{et} \quad E = E_0 + v_0 t + \frac{1}{2} \frac{F}{m} t^2.$$

Éliminant t entre ces deux équations, il vient (*Int.*, 1145) :

$$2 \frac{F}{m} (E - E_0) = v^2 - v_0^2,$$

d'où on tire, en multipliant les deux membres par $\frac{m}{2}$,

$$F(E-E_o)=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_o^2. \qquad (a)$$

$E-E_o$ étant le chemin parcouru pendant l'action de la force F,

$F(E-E_o)$ est le travail $\mathcal{T}$ produit par F pendant cette même durée d'action (27).

$\frac{1}{2}mv_o^2$ étant la puissance vive au commencement de l'action de la force F, et $\frac{1}{2}mv^2$, la puissance vive à la fin de cette action, comme de plus les quantités $\frac{1}{2}mv_o^2$ et $\frac{1}{2}mv^2$ sont toujours positives, l'équation (a) fait voir que la quantité de travail est toujours algébriquement égale à la différence obtenue en retranchant la puissance vive avant l'action de la force de la puissance vive après l'action; ainsi, considérant comme gain de puissance vive une différence positive, et comme perte une différence négative, on peut énoncer le principe général des puissances vives :

Le travail produit par une force agissant sur un corps est toujours égal au gain ou à la perte de puissance vive qu'éprouve ce corps pendant l'action de la force.

L'expression du travail d'une force en fonction des puissances vives est d'un usage très-fréquent en mécanique (*Int.*, 1146).

30. Dans le cas où $v_o=0$ et $E_o=0$, c'est-à-dire quand le corps part du repos et que les espaces sont comptés à partir du point de départ, la formule (a) n° 29 devient

$$\mathcal{T}=FE=\frac{1}{2}mv^2.$$

Remplaçant m par $\frac{P}{g}$ (22), on a

$$\mathcal{T}=FE=\frac{Pv^2}{2g},$$

nouvelle expression du travail, dont on fait usage pour les applications.

31. Comme $\frac{v^2}{2g}=h$, h étant la hauteur correspondant à la vitesse v (18), on a

$$\mathcal{T}=FE=Ph.$$

Le travail produit par une force quelconque est donc égal au poids du corps sollicité multiplié par la hauteur correspondant à la vitesse communiquée à ce corps, c'est-à-dire qu'il est égal au travail qui serait produit par le poids P descendant de la hauteur h ou à celui qu'il faudrait produire pour élever ce poids à la hauteur h.

32. Ainsi le travail produit par une force quelconque peut toujours être ramené à un poids élevé à une certaine hauteur.

Aussi a-t-on adopté pour *unité de travail*, le travail dû au poids de un kilogramme élevé à un mètre de hauteur, et on l'a appelé *kilogrammètre*, que l'on représente par $1^{\text{kilog.m}}$, ou $1^{\text{k.m}}$, ou plus simplement encore par 1^{km}.

F étant exprimé en kilogrammes et E en mètres, le travail est donc (31)

$$\mathcal{T} = FE^{\text{km}}.$$

33. Quand F est exprimé en unités de 1000 kilogrammes, le produit FE représente le travail en unités de 1000^{km}, que l'on appelle *grandes unités dynamiques*.

34. Le produit FE^{km} représente un travail indépendant du temps pendant lequel il a été produit; mais l'on conçoit que pour comparer les puissances dynamiques des forces ou des moteurs quelconques, il faut comparer les travaux produits dans un temps donné : ainsi les forces F et F′ produisant respectivement FE^{km} et $F'E'^{\text{km}}$ en une seconde, il en résulte que les puissances dynamiques des deux forces sont dans le rapport de FE à F′E′.

35. Afin de pouvoir énoncer la puissance dynamique d'une force ou comparer les effets dynamiques des différentes forces sans avoir égard au temps, on a adopté une unité de travail dépendante du temps. Cette unité, que l'on appelle *cheval-vapeur*, équivaut à 75^{km} produits dans une seconde; d'où il résulte que si, pour une seconde, $F'E' = 75^{\text{km}}$, la puissance dynamique de la force F′ est de un cheval-vapeur, et, pour le même temps, le rapport $\frac{FE}{F'E'} = \frac{FE}{75}$ indique la puissance dynamique de la force F en chevaux-vapeur.

Le cheval-vapeur est d'un usage continuel pour évaluer la puissance des machines. Quand on dit qu'une machine est de la puissance dynamique de 10 chevaux, par exemple, ou improprement de la force de 10 chevaux, cela veut dire que le travail dynamique produit par la machine en une seconde équivaut à $75 \times 10 = 750^{\text{km}}$.

Le cheval vivant produit moins de 75^{km} par seconde. Ainsi un cheval attelé à une voiture et allant au pas produit moyennement une traction de 70 kilogrammes avec une vitesse de $0^{\text{m}},90$ par seconde, ce qui fait une puissance dynamique de 63^{km} par seconde ou $\frac{63}{75}$ de cheval-vapeur.

De plus, comme un cheval vivant ne peut travailler que 8 heures sur 24, il en résulte que dans un travail continu un cheval-vapeur remplace plus de trois chevaux.

36. *TABLEAU des quantités de travail moyennes et journalières produites par les moteurs animés dans différentes circonstances.*

NATURE DU TRAVAIL.	POIDS élevé ou effort moyen exercé.	VITESSE par seconde.	TRAVAIL par seconde.	DURÉE du travail journalier.	QUANTITÉ de travail journalière.
1° ÉLÉVATION VERTICALE DES POIDS.	kilog.	mètres.	k.m.	heures.	k.m.
Un homme montant une rampe douce ou un escalier, sans fardeau, son travail consistant dans l'élévation du poids de son corps.	65	0.15	9.75	8	280 800
Un manœuvre élevant des poids avec une corde et une poulie, ce qui l'oblige à faire descendre la corde à vide. . . .	18	0.20	3.6	6	77 760
Un manœuvre élevant des poids en les soulevant avec la main.	20	0.17	3.4	6	73 440
Un manœuvre élevant des poids en les portant sur son dos au haut d'une rampe douce ou d'un escalier, et revenant à vide.	65	0.04	2.6	6	56 160
Un manœuvre élevant des matériaux avec une brouette en montant une rampe au 1/12, et revenant à vide..	60	0.02	1.2	10	43 200
Un manœuvre élevant des terres à la pelle à la hauteur moyenne de 1m,60.	2.7	0.40	1.08	10	38 880
2° ACTION SUR LES MACHINES ET OUTILS.					
Un manœuvre agissant sur une roue à chevilles ou à tambour:					
1° Au niveau de l'axe de la roue.	60	0.15	9	8	259 200
2° Vers le bas de la roue ou à 24°.	12	0.70	8.4	8	241 920
Un manœuvre marchant et poussant ou tirant horizontalement d'une manière continue.. . .	12	0.60	7.2	8	207 360
Un manœuvre agissant sur une manivelle.	8	0.75	6	8	172 800
Un manœuvre exercé poussant et tirant alternativement dans le sens vertical.	6	0.75	4.5	10	162 000
Un cheval attelé à une voiture et allant au pas.	70	0.90	63	10	2 168 000
Un cheval attelé à une voiture et allant au trot.	44	2.20	96.8	4.5	1 568 160
Un cheval attelé à un manége et allant au pas.	45	0.90	40.5	8	1 166 400
Un cheval attelé à un manége et au trot.	30	2.00	60	4.5	972 000

NATURE DU TRAVAIL.	POIDS élevé ou effort moyen exercé.	VITESSE par seconde.	TRAVAIL par seconde.	DURÉE du travail journalier.	QUANTITÉ de travail journalière.
	kilog.	mètres.	k.m.	heures.	k.m.
Un bœuf attelé à un manége et allant au pas.	60	0.60	36	8	1 036 800
Un mulet attelé à un manége et allant au pas.	30	0.90	27	8	777 600
Un âne attelé à un manége et allant au pas.	14	0.80	11.2	8	322 560
3° TRANSPORT HORIZONTAL DES POIDS.					
Un homme marchant sur un chemin horizontal, sans fardeau, son travail consistant dans le transport du poids de son corps.	65	1.50	97.5	10	3 510 000
Un manœuvre transportant des matériaux dans une petite charrette ou camion à deux roues, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. .	100	0.50	50	10	1 800 000
Un manœuvre transportant des matériaux dans une brouette, et revenant à vide chercher de nouvelles charges.	60	0.50	30	10	1 080 000
Un homme voyageant en transportant des fardeaux sur son dos.	40	0.75	30	7	756 000
Un manœuvre transportant des matériaux sur son dos, et revenant à vide chercher de nouvelles charges.	65	0.50	32.5	6	702 000
Un manœuvre transportant des fardeaux sur une civière, et revenant à vide chercher de nouvelles charges.	50	0.33	16.5	10	594 000
Un manœuvre employé à jeter de la terre au moyen de la pelle, à 4 mèt. de distance horizontale.	2.7	0.68	1.8	10	64 800
Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, et marchant au pas continuellement chargé	700	1.10	770	10	27 720 000
Un cheval attelé à une voiture, et marchant au trot continuellement chargé.	350	2.20	770	4.5	12 474 000
Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, au pas, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. .	700	0.60	420	10	15 120 000
Un cheval chargé sur le dos et allant au pas.	120	1.10	132	10	4 752 000
Un cheval chargé sur le dos et allant au trot.	80	2.20	176	7	4 435 000

Les résultats de la troisième partie de ce tableau expriment des effets utiles proprement dits, c'est-à-dire que les poids des machines ou outils qui ont servi au transport ne sont pas compris dans les nombres qui indiquent les charges traînées; de plus, ces résultats supposent les routes d'une viabilité ordinaire.

37. *Les moteurs animés peuvent faire varier, dans de certaines limites, l'effort produit, la vitesse et la durée du travail journalier;* mais l'expérience prouve qu'un tel moteur fournit le maximum d'effet journalier : 1° quand l'effort qu'il produit varie du 1/3 au 1/5 de celui qu'il pourrait produire, sans vitesse, pendant un temps peu prolongé; 2° quand la vitesse varie du 1/4 au 1/6 pour l'homme, et du 1/12 au 1/15 pour le cheval, de la plus grande vitesse que ces moteurs pourraient prendre, pendant un temps peu prolongé, en ne produisant aucun effort; 3° quand la durée du travail journalier varie de la 1/2 au 1/3 du temps le plus prolongé pendant lequel le travail peut être constamment soutenu, sans nuire à la santé de l'homme ou des animaux; ce temps ne peut dépasser dix-huit heures par jour, quelque petite que soit la tâche journalière, ne consisterait-elle qu'en une présence constante sur les ateliers.

38. *Voici quelques résultats que nous extrayons du Traité des moteurs, par* M. Courtois, ingénieur en chef des ponts et chaussées :

Un homme d'une taille médiocre et d'une force ordinaire pèse 70 kilogrammes, y compris ses vêtements.

Le plus grand effort qu'il puisse exercer en tirant ou poussant horizontalement est de 50 à 60 kilogrammes.

L'effort que l'homme peut exercer avec les bras est d'environ 80 kilogrammes.

Le plus grand poids qu'il peut porter est ordinairement 150 kilogrammes, et s'élève parfois à 450 kilogr.; celui qu'il peut soulever varie de 200 à 300 kilogr.

La vitesse du coureur peut être de 13 mètres par seconde pendant quelques instants; la vitesse ordinaire est de 7 mètres, celle de la marche d'environ 2 mètres, et celle du voyageur $1^m,60$.

La force moyenne des femmes est égale à celle d'un adulte de 15 à 16 ans, et ne surpasse pas les deux tiers de celle de l'homme.

Un ouvrier exercé, de même force qu'un autre, fait souvent un travail double et même triple sans éprouver plus de fatigue.

Un manœuvre qui monte un escalier sans charge prend, pendant un travail journalier de 8 heures, une vitesse de $0^m.15$.

Le pas horizontal de l'homme est de $0^m.65$. La plus grande hauteur verticale que l'homme qui travaille puisse franchir sans gêne est de $0^m.25$.

Le soldat chargé de 15 à 20 kilogrammes, sur un beau chemin en pays de plaine, peut parcourir 49 kilomètres en 10 heures de marche par jour. La marche ordinaire de nos armées varie de 28 à 36 kilomètres par jour; pendant les dernières guerres, cette vitesse a même atteint quelquefois 48 et même 60 kilomètres.

Un colporteur chargé de 44 kilogrammes parcourt 20 kilomètres par jour.

Les portefaix de Rive-de-Gier qui chargent les bateaux portent un hectolitre de houille de 85 kilogrammes à 36 mètres, et font de 290 à 300 voyages par jour.

D'après Coulomb, un homme qui porte des fardeaux à une assez grande distance et revient à vide peut porter $61^k.25$, et parcourir dans sa journée 11 kilomètres avec cette charge, et par conséquent la même distance à vide.

Sur un sol horizontal, un homme transporte, dans sa journée de 10 heures,

en 500 brouettées de 60 kilogrammes, 20 mètres cubes de terre à 30 mètres.

D'après Coulomb, le travail utile maximum d'un homme qui monte en portant une charge de 65 à 70 kilogrammes n'est que le 1/4 du travail qu'il peut développer lorsqu'il monte libre et sans charge.

Dans des terrassements exécutés au fort de Vincennes, où l'homme élevait les matériaux par le poids de son corps, chaque manœuvre élevait dans sa journée 310 fois le poids de son corps à 13 mètres de hauteur.

Le poids des chevaux varie de 300 à 700 kilogrammes; il existe même des petits chevaux appelés *poneys*, dont le poids est à peine de 200 kilogrammes. Celui des chevaux de malles-postes ou de diligences est ordinairement de 450 kilogrammes.

Le plus grand effort des chevaux de trait varie de 300 à 500 kilogrammes.

La plus grande vitesse que puisse prendre un cheval dans une course d'un quart d'heure ne dépasse pas 14 à 15 mètres (courses du Champ-de-Mars); la vitesse du cheval au galop est de 10 mètres; au trot elle est de $3^m.50$ à 4 mètres; au grand pas, de 2 mètres, et au petit pas, de 1 mètre

Les chevaux de malles-postes traînent 500 kilogrammes à la vitesse de $4^m.44$, et parcourent 20 kilomètres par jour; ceux des diligences, 800 kilogrammes à la vitesse de $3^m.33$, et parcourent 24 kilomètres; ceux des chasse-marées, 560 kilogrammes à la vitesse de $2^m.20$, et parcourent 32 kilomètres.

Sur le dos, la charge du cheval est moyennement de 100 à 175 kilogrammes; les pelletiers anglais la purtent quelquefois à 200 ou 250 kilogrammes à une faible vitesse.

Un cheval portant son cavalier du poids de 80 kilogrammes et marchant pendant 7 heures parcourt 40 kilomètres, ce qui donne une vitesse de $1^m.59$.

39. Le tableau suivant, qui donne le rapport de l'effort de tirage à la charge traînée, voiture comprise, sur les différentes espèces de chemins, permet de comparer l'*effet utile* produit par les moteurs animés, dans le transport horizontal des fardeaux sur ces chemins, au travail dépensé par ces moteurs. Ce tableau est le résultat des expériences de MM. Boulard, Rumford, Régnier et de quelques autres observateurs.

NATURE DE LA VOIE SUPPOSÉE HORIZONTALE.		RAPPORT du tirage à la charge totale.
Terrain naturel, non battu et argileux, mais sec.		0.250
Id. *id.* siliceux et crayeux.		0.165
Terrain ferme battu et très-uni.		0.040
Chaussée en sable ou cailloutis nouvellement placés.		0.125
Id. en empierrement, à l'état d'entretien ordinaire.		0.080
Id. *id.* parfaitement entretenue et roulante.		0.033
Id. pavée à la manière ordinaire, et la voiture étant suspendue.	au pas.	0.030
	au grand trot.	0.070
Id. pavée en carreaux de grès bien entretenus.	au pas.	0.025
	au grand trot.	0.060
Id. en madriers de chêne non rabotés.		0.022
Chemins à ornières plates, en fonte de fer, ou en dalles très-dures et très-unies.		0.010
Chemins de fer à ornières saillantes, en bon état d'entretien.		0.007
Id. *id.* parfaitement entretenues, et les essieux continuellement huilés.		0.005

Le poids de la voiture varie ordinairement entre le 1/3 et le 1/4 de la charge totale.

40. *TABLEAU des rapports de la force de tirage à la charge*

DÉSIGNATION DE LA ROUTE PARCOURUE PAR LA VOITURE.	VALEURS de l = r = r' = r'' = fr =	AFFUTS et charrettes d'artillerie. 0m.10 à 0m.12 0m 038 0m 782 0m.782 0.00247
Accotement en terre, en très-bon état, à peu près sec.		0.029
Accotement solide recouvert d'une couche de gravier de 0m.03 à 0m 04 d'épaisseur.		0 073
Accotement solide recouvert d'une couche de gravier de 0m.05 à 0m 06 d'épaisseur.		0.086
Sol en terre ferme recouvert de 0m.10 à 0m.15 de gravier, ou route neuve.		0.092
Accotement ou route couverte de neige non frayée.		0.054
Sol en terre ferme, recouvert d'une couche de sable fin mêlé de gravier de 0m.10 à 0m.15 d'épaisseur.		0.098
Route en empierrement — en très-bon état, très-sèche et très-unie.		p. 0.016 t. 0.020
Route en empierrement — un peu humide ou couverte de poussière, avec quelques cailloux à fleur du sol.		0.022
Route en empierrement — très solide, avec gros cailloux à fleur du sol.		0.018
Route en empierrement — solide, avec frayé léger et boue molle.		0.029
Route en empierrement — solide, avec ornières et boue.		0.035
Route en empierrement — avec détritus et boue épaisse.		0.041
Route en empierrement — très-dégradée, ornières profondes de 0m.06 à 0m.08, boue épaisse.		0.054
Route en empierrement — très-mauvaise, ornières profondes de 0m.10 à 0m.12, boue épaisse, fond dur et inégal.		0.061
Pavé en grès de Sierck serré.		0.012
Pavé en grès de Fontainebleau — ordinaire sec.		0.013
Pavé en grès de Fontainebleau — en état ordinaire, mouillé et couvert de boue.		0.017
Tablier de pont en madriers.		0.018

l largeur de la jante;
r rayon des essieux;
r' rayon des petites roues;
r'' rayon des grandes roues;
f coefficient de frottement de l'essieu;

totale traînée, d'après les expériences de M. Morin.

CHARIOTS d'artillerie.	CHARIOTS comtois.	VOITURES DE ROULAGE.		CHARRETTES.		DILIGENCES des grandes messageries.	VOITURES à bancs suspendus.
$0^{m}.070$ à $0^{m}.075$ $0^{m}.038$ $0^{m}.575$ $0^{m}.740$ 0.00247	$0^{m}.06$ à $0^{m}.07$ $0^{m}.027$ $0^{m}.622$ $0^{m}.728$ 0.00175	$0^{m}.10$ à $0^{m}.12$ $0^{m}.032$ $0^{m}.430$ $0^{m}.780$ 0.00208	$0^{m}.10$ à $0^{m}.12$ $0^{m}.032$ $0^{m}.85$ $0^{m}.85$ 0.00208	$0^{m}.10$ à $0^{m}.12$ $0^{m}.032$ $0^{m}.80$ 0.00208	$0^{m}.10$ à $0^{m}.12$ $0^{m}.032$ $1^{m}.00$ 0.00208	$0^{m}.10$ à $0^{m}.12$ $0^{m}.021$ $r' + r'' =$ $1^{m}.12$ 0.00208	$0^{m}.07$ à $0^{m}.08$ $0^{m}.027$ $0^{m}.45$ $0^{m}.70$ 0.00175
0.033 0.085 0.099 0.107 0.062	0.032 0.084 0.099 0.106 0.061	0.037 0.005 0.112 0.120 0.070	0.031 0.081 0.096 0.103 0.060	0.028 0.071 0.084 0.090 0.053	0.022 0.057 0.067 0.071 0.042	*p. t.* 0.038 *p. t.* 0.009 *p. t.* 0.116 *p. t.* 0.125 0.073	*p. t.* 0 038 *p. t.* 0.099 *p. t.* 0.116 *p. t.* 0.125 »
0.123	0.112	0.127	0.109	0.005	0.076	*p. t.* 0.138	*p. t.* 0.145
0.018	0.017	0.020	0.017	0.015	0.012	*p.* 0.021 *t.* 0.024 *g. t* 0 025	*p.* 0.020 *t.* 0.024 *g. t.* 0.025
0.026	0.024	0.028	0.024	0.021	0.017	*p.* 0.030 *t.* 0.037 *g. t.* 0.041	*p.* 0.020 *t.* 0.037 *g. t.* 0.041
0.021	0.020	0.023	0.020	0.018	0.014	*p.* 0.025 *t.* 0.038 *g. t.* 0.044	*p.* 0 024 *t.* 0.037 *g. t.* 0.044
0.033	0.032	0.037	0.031	0.028	0.022	*p.* 0.038 *t.* 0.046 *g. t.* 0 030	*p.* 0.038 *t.* 0.045 *g. t.* 0.049
0.041	0.040	0.045	0.030	0.034	0.027	*p.* 0.048 *t.* 0.054 *g. t.* 0.058	*p.* 0.047 *t.* 0 054 *g. t.* 0.058
0.048	0.047	0.053	0.046	0.040	0.032	*p.* 0 056 *t.* 0.063 *g. t.* 0.067	*p.* 0.055 *t.* 0.063 *g. t.* 0 067
0.063	0.063	0.070	0.060	0.053	0.042	*p.* 0.073 *t.* 0 081 *g. t.* 0.085	*p.* 0.072 *t.* 0.080 *g. t.* 0 084
0.070	0.069	0.079	0.007	0.050	0.047	*p* 0.082 *t.* 0.095	*p.* 0.081 *t.* 0.100
0.014	0.013	0.016	0.013	0.012	0.09	*p.* 0.016 *t.* 0.024 *g. t.* 0 028	*p.* 0 016 *t* 0.024 *g. t.* 0 027
0.015	0.014	0.017	0.014	0.012	0.010	*p.* 0.017 *t.* 0.026 *g. t.* 0.031	*p.* 0 017 *t* 0.026 *g. t.* 0 030
0.020	0.010	0.022	0.019	0.016	0.013	*p.* 0.023 *t.* 0 030 *g. t.* 0.034	*p.* 0.022 *t* 0.030 *g. t.* 0 033
0.021	0.020	0.023	0.020	0.014	0.014	*p. t.* 0.024	*p. t.* 00 24

fr moment du frottement de l'essieu ;
p signifie au pas ;
t *id.* au trot ;
g. t. *id.* au grand trot ;
p. t. *id.* au pas et au trot.

41. *TABLEAU des efforts qu'un manœuvre de force ordinaire peut exercer pendant un court intervalle de temps, en agissant sur différents outils.*

DÉSIGNATION DES INSTRUMENTS.	EFFORT en kilogrammes.
Une plane	45
Une tarière avec les deux mains	45
Une clef d'écrou	38
Un étau ordinaire en agissant sur la clef	33
Un ciseau ou un foret dans le sens vertical	33
Une manivelle	30
Une tenaille ou une pince, en agissant par compression	27
Un rabot à main	23
Un étau à main	20
Une scie à main	16
Un vilebrequin	7
Un petit tournevis, ou en tournant avec le pouce et les doigts	6

PESANTEURS SPÉCIFIQUES.

42. La *densité* ou la *pesanteur spécifique*, ou encore le *poids spécifique* d'un corps, est le nombre d'unités de poids que pèse l'unité de volume de ce corps.

Comme on a l'habitude de prendre pour unité de poids le kilogramme, et pour unité de volume le décimètre cube, la densité d'un corps est le nombre qui exprime combien un décimètre cube de ce corps pèse de kilogrammes : ainsi le poids d'un décimètre cube d'eau distillée à son maximum de densité, c'est-à dire à la température de 4°, étant 1 kil., la densité de cette eau est égale à un.

De cette définition, il résulte qu'en général on a

$$d=\frac{P}{V}, \quad \text{d'où} \quad P=dV \quad \text{et} \quad V=\frac{P}{d}$$

d densité ;
P poids du corps en kilogrammes ;
V volume du corps en décimètres cubes.

Applications : 1° Le poids d'un morceau de fer est $35^k,046$ et son volume $4^{d.c.},5$, quelle est sa densité ?

La première des formules précédentes donne

$$d=\frac{35,046}{4,5}=7,788.$$

2° Quel est le poids d'un morceau de fer dont le volume est $4^{d.c.},5$?
La densité du fer étant 7,788, la 2ᵉ des formules précédentes donne

$$P = 7{,}788 \times 4{,}5 = 35^{k},046.$$

3° Pour $P = 35^{k},046$ et $d = 7{,}788$, la 3ᵉ des formules précédentes donne

$$V = \frac{35^{k},046}{7{,}788} = 4^{d\,c.},5.$$

13. *Remarques :* 1° Dans la pratique, on peut sans inconvénient supposer que la densité de l'eau ordinaire est égale à l'unité, au lieu de 0,9987 qu'elle est moyennement dans nos climats, et, de plus, aux températures ordinaires de l'atmosphère, on peut, sans erreur sensible, négliger l'influence de la dilatation sur la densité des corps.

2° Pour les gaz et les vapeurs, on prend pour unité de densité la densité de l'air à la température de 0° et sous la pression atmosphérique de $0^{m},76$ de mercure.

Par rapport à l'eau, la densité de l'air à 0° et sous la pression $0^{m},76$ est, d'après MM. Biot et Arago, $\frac{1}{770} = 0{,}001299$, et plus rigoureusement, 0,001299541 ; par rapport au mercure, elle est $\frac{1}{10366} = 0{,}000096$.

D'après les expériences plus récentes de M. Regnault, 1 litre d'air à 0° et sous la pression $0^{m},76$ pèse $1^{g},293187$, un litre d'eau au maximum de densité pèse $1000^{g},00$, et un litre de mercure à 0° $13595^{g},93$. Par rapport à l'eau, la densité de l'air à 0° et sous la pression $0^{m},76$ est 0,001293187, et par rapport au mercure 0,0000951 (consulter le tableau suivant).

44. *TABLEAU des densités de quelques corps.*

SOLIDES.			
DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉS.	DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉS.
Platine. laminé	22.0690	Flint-glass anglais	3.3293
Platine. passé à la filière	21.0417	Spath fluor rouge	3.1911
Platine. forgé	20.3366	Tourmaline verte	3.1555
Platine. purifié	19.5000	Saphir du Brésil	3.1308
Or. forgé	19 3617	Asbeste roide	2.9958
Or. coulé	19,2581	Marbre de Paros	2.8376
Or. monnaie de France	17 65	Quartz-jaspe onyx	2.8166
Tungstène	17.0000	Émeraude verte	2.7755
Mercure	13 5980	Perles	2.7500
Palladium	11 8	Chaux carbonatée cristallis.	2.7182
Plomb	11.445	Quartz-jaspe	2.7101
Rhodium, environ	10 6	Corail	2 6800
Argent fondu	10.4743	Cristal de roche pur	2.6530
Bismuth	9,9	Quartz-agate	2.6150
Cuivre en fil	8.8785	Feldspath limpide	2.5644
Nickel, environ	8 8	Verre de Saint-Gobin	2.4882
Cuivre rouge fondu	8.7880	Porcelaine de Chine	2.3847
Bronze écroui	8.70	Chaux sulfatée cristallisée	2 3177
Bronze d'artillerie	8,67	Chaux, environ	2.3
Molybdène	8,6110	Graphite naturel	2.20
Ruthénium, environ	8,6	Porcelaine de Sèvres	2.1457
Cuivre jaune non forgé	8.40	Potasse, environ	2.1
Sulfure de mercure, cinabre	8.1	Soufre natif	2.0332
Urane	8.1000	Soufre fondu	1.99
Manganèse pur, environ	8.0	Azotate de potasse	1.933
Acier non écroui	7.8163	Sel commun	1.92
Cobalt fondu	7.8119	Ivoire	1.9170
Fer en barre	7.7880	Nitre	1.90
Fer de 7,7 à	7.9	Albâtre	1.8740
Étain fondu	7.2914	Chlorure de potassium, en-	
Fer fondu	7.2070	viron	1.84
Zinc laminé	7 19	Anthracite	1.8000
Zinc fondu	6.8610	Phosphore, environ	1.77
Antimoine, environ	6.8	Alun	1.7200
Protochlorure de mercure,		Houille compacte	1.3292
sublimé corrosif	6.5	Jais	1.2590
Tellure	6.1150	Succin	1.0780
Chrome	5.9000	Résine	1 07
Arsenic, environ	5.8	Camphre	0.986
Iode	4.9480	Sodium	0 9726
Spath pesant	4.4300	Cire	0.97
Jargon de Ceylan	4.4161	Poudre de guerre	0.95
Rubis oriental	4.2833	Beurre	0.94
Topaze orientale	4.0107	Glace fondante	0.9300
Saphir oriental	3.9941	Caoutchouc	0.925
Alumine naturelle	3.9	Potassium	0 8651
Topaze de Saxe	3.5640	Bois de hêtre	0.8520
Béril oriental	3.5489	Frêne	0 8450
Diamants les plus lourds, lé-		If	0.8070
gèrement colorés en rose	3.5310	Orme rouge	0.8000
Diamants les plus légers	3.5010	Orme blanc	0.67

DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉS.	DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉS.
Pommier.	0.7330	Bois de cèdre.	0.5610
Bois d'oranger.	0.7050	Peuplier blanc d'Espagne. .	0.5200
Sapin jaune.	0.6570	Bois de sassafras.	0.4820
Tilleul.	0.6010	Peuplier ordinaire.	0.3830
Bois de cyprès.	0.5980	Liége.	0.2400

LIQUIDES.

Mercure.	13.5080	Éther azotique.	1.112
Id. (d'après M. Regnault).	13.50503	Acide acétique monohydraté	
Brome.	2.97	à 18°.	1.063
Acide sulfurique concentré,		Éther sulfureux.	1.085
consistance oléagineuse. .	1.843	Eau de la mer.	1.0263
Id. sortant des chambres		Lait.	1.0300
en plomb, de 1.35 à. . .	1.50	Eau distillée.	1.0000
Id. concentré dans les		Vin de Bordeaux.	0.0930
chaudières en plomb, en-		Vin de Bourgogne.	0.9015
viron.	1.75	Acide butyrique.	0.063
Id. concentré dans une		Huile de lin.	0.04
cornue en platine. . . .	1.85	Huile de pavots.	0.93
Chlorure d'azote.	1.653	Huile d'olives.	0.0153
Acide azoteux.	1.5500	Éther acétique à 0°.	0.007
Chlorure de silicium. . . .	1.52	Éther azoteux.	0.886
Sulfure de carbone à 0°. .	1.293	Huile essentielle de téré-	
Id. à 15°.	1.271	benthine.	0.875
Liqueur des Hollandais à 0°.	1.280	Bitume liquide, dit naphte.	0.8475
Acide lactique très-concentré	1.22	Acétal pur.	0.844
Eau de la mer Morte. . . .	1.2403	Huile de naphte ou pé-	
Acide azotique.	1.2175	trole.	0.84
Id. le plus concentré, con-		Alcool du commerce. . . .	0.84
tenant 14 p. 100 d'eau. .	1.522	Alcool absolu.	0.792
Id. contenant 40 p. 100		Esprit de bois.	0.798
d'eau.	1.42	Acide cyanhydrique.	0.697

DENSITÉS de quelques gaz à 0° et sous la pression 0m.76, celle de l'air étant 1.

Air.	1.0000	Acide carbonique.	1 520
Gaz iodhydrique.	4.443	Acide chlorhydrique. . . .	1.2474
Chlorure de bore.	4.035	Acide formique.	1.235
Fluorure de silicium. . . .	3.5735	Acide hydrosulfurique. . .	1.1012
Gaz chloroxycarbonique. . .	3.407*	Hydrogène phosphoré. . . .	1.185
Acide hypochloreux.	2.077	Oxygène.	1.1056
Acide bromhydrique. . . .	2.731	Deutoxyde d'azote.	1.0388
Hydrogène arsénié.	2.695	Hydrogène bicarboné. . . .	0.9784
Chlore.	2.440	Azote.	0.0713
Oxyde de chlore.	2.315*	Oxyde de carbone.	0.9674
Fluorure de bore.	2.371	Ammoniaque.	0.5967
Acide sulfureux.	2.247	Hydrogène protocarboné des	
Cyanogène.	1.860	marais.	0.559
Protoxyde d'azote.	1.527	Hydrogène.	0.0692

* Densités calculées.

DENSITÉS de quelques gaz à 0° et sous la pression 0m.76, celle de l'air étant 1.
(D'après les expériences de M. Regnault.)

DÉSIGNATION DES CORPS.	POIDS du litre de gaz.	DENSITÉS.	DÉSIGNATION DES CORPS.	POIDS du litre de gaz.	DENSITÉS.
	gr.			gr.	
Air.	1.203187	1.00000	Oxygène. . . .	1.429802	1.10563
Hydrogène. . .	0.089578	0.06926	Acide carbonique.	1.977414	1.52901
Azote.	1.256167	0.97137			

DENSITÉS de quelques vapeurs ramenées par le calcul à 0° et à la pression 0m.76.

Vapeur de protoiodure de mercure.	15.68	Vapeur de protochlorure de phosphore.	4.744
— d'arsenic.	10.37	— de naphtaline.	4.5280
— de protochlorure de mercure. Sublimé corrosif.	9.416	— de chlorure de soufre.	4.468
— de perchlorure d'étain. .	9.200	— de phosphore.	4.326
— d'iode.	8.716	— de chlorure de bore. . .	3.942
— de sous-chlorure de mercure. Calomel.	8.196	— de perchlorure de phosphore.	3.66
— de mercure.	6.976	— de liqueur des Hollandais	3.45
— de perchlorure de titane.	6.856	— d'hydrobicarbonate de chlore.	3.443
— de soufre.	6.654	— nitreuse.	3.180*
— de chlorure d'arsenic. .	6 301	— d'acide butyrique. . . .	3.09
— de chlorure de silicium.	5 939	— d'éther acétique.	2.920
— d'éther hydriodique. . .	5.4749	— d'hydrogène arseniqué. .	2.695
— d'éther benzoïque. . . .	5.409	— de sulfure de carbone. .	2.67
— de sulfure de mercure. Cinabre.	5.4	— d'éther sulfurique . . .	2.586
— de brome.	5.39	— d'acide fluoborique. . .	2.312
— de camphre.	5.32	— d'éther hydrochlorique.	2.219
— d'éther oxalique.	5.087	— d'acide chlorocyanique.	2.1228*
— d'essence de térébenthine.	4.76	— d'alcool absolu.	1.5890
		— d'acide formique. . . .	1.554
		— d'acide hydrocyanique. .	0.947
		— de carbone.	0.890
		— d'eau.	0.6235

* Densités calculées.

En pratique, on peut admettre que la densité de la vapeur d'eau, à une pression quelconque, est les 4/5 de celle de l'air à la même température et à la même pression.

45. *TABLEAU du poids d'un mètre cube de divers corps dont les densités n'ont pu être déterminées d'une manière aussi précise que pour les précédents.*

(M. Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle.*)

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube.	DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS. du mètre cube.
	kil.		kil.
Pierre à plâtre ordinaire. . .	2168	Terre argileuse.	1600
Gypse ou plâtre fin.	2264	Terre glaise.	1900
Pierre meulière.	2484	Maçonnerie de moellons ordinaires, de 1700 kil. à. . .	2300
Marbre noir et blanc.	2717		
Briques { les plus cuites. . .	2200	Chêne le plus pesant, le cœur.	1170
Briques { les moins cuites .	1500	Chêne le plus léger, sec. . . .	850
Tuiles ordinaires.	2000	Huile de lin.	940
Sable pur.	1900	Huile de navette.	919
Sable terreux.	1700	Alcool ordinaire ou esprit-de-vin.	837
Terre végétale légère.	1400		

Géniets, *Recueil de tables.*

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube. de	à
1° *Substances d'origine minérale.*	kil.	kil.
Eau. . { distillée et de pluie.	»	1000
Eau. . { de rivière, environ.	»	1000
Eau. . { de puits.	1000	1014
Eau. . { de mer.	1028	1042
Terre ou sable de bruyère.	614	643
Terreau.	828	857
Tourbe { sèche.	514	»
Tourbe { humide.	785	»
Terre végétale.	1214	1285
Terre forte graveleuse.	1357	1428
Vase.	1642	»
Argile et glaise.	1656	1756
Marne.	1571	1642
Sable { fin et sec.	1399	1428
Sable { fin et humide.	1900	»
Sable { fossile argileux.	1713	1799
Sable { de rivière humide.	1771	1856
Gravier cailluutis.	1371	1485
Grosse terre mêlée de sable et de gravier.	1860	»
Terre mêlée de petites pierres.	1910	»
Argile mêlée de tuf.	1900	»
Terre grasse mêlée de cailloux.	2200	»
Écalins de roches.	1571	1713
Ciment de terre cuite.	1171	1228
Mâchefer, scories de forges.	771	985
Laitier vitreux.	1428	1485

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.		POIDS du mètre cube. de	à
		kil.	kil.
Pouzzolane	d'Italie	1157	1228
	du Vivarais	1085	1128
Trass de Hollande ou trass d'Andernach		1071	1085
Pierre ponce		557	928
Chaux	vive sortant du four	800	857
	éteinte, en pâte ferme	1328	1428
Mortier de chaux et de	sable	1856	2142
	ciment	1656	1713
	mâchefer	1128	1214
	laitier	1856	1942
Brique		1000	1471
Ardoise, environ		2600	»
Craie		1214	1285
Pierre à bâtir	tendre	1142	1713
	franche demi-roche	1713	1999
	liais doux et roche	2142	2284
	roches dures, liais	2284	2427
	très-compacte, cliquart	2499	2713
Albâtres, marbres, brèches, lumachelles, brocatelles		2199	2870
Chaux fluatée, spath fluor		3084	3184
Chaux fluatée calcarifère, gypse ou pierre à plâtre crue et alabastrite		1899	2299
Plâtre cuit battu		1199	1228
Id. tamisé		1242	1257
L'eau pour gâcher pèse		328	343
Plâtre gâché humide		1571	1599
Id. sec		1390	1414
L'eau vaporisée pèse		171	186
L'eau combinée par cristallisation pèse		157	157
Maçonnerie fraîche en	moellons	2230	2250
	briques	1860	1890
Baryte		4284	4626
Quartz, pierre meulière poreuse		1242	1285
Id. *Id.* compacte écailleuse		2485	2613
Quartz hyalin		2642	2656
Quartz arénacé ou grès à bâtir		1928	2070
Id. à paveur		2427	2613
Quartz résinite pechstein ou pierre de poix		2042	2656
Quartz ou silex pyromaque, pouding		2570	2027
Jaspe		2356	2813
Feldspath, pétrosilex		2570	2742
Trapp, cornéenne, pierre de touche		2609	2742
Porphyre, ophite, serpentine variolite		2756	2927
Talc, stéatite, chlorite		2613	2784
Serpentine		2770	2856
Pierre ollaire		2742	2856
Granite, siénite, gneiss		2356	2956
Granitelle		2799	3056
Mica		2570	2997
Amiante		1556	1785
Schiste	grossier	1813	2784
	tégulaire, ardoise	2742	2856
Trématode, pierre de Volvic		1928	2642
Laves, lithoïdes, basaltes		2756	3056

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube. de	POIDS du mètre cube. à
	kil.	kil.
Laves du Vésuve	1713	2813
Tufs volcaniques	1214	1385
Scories volcaniques	785	885
Houille, charbon de terre	942	1328
2° *Métaux.*		
Or à 24 carats, fondu, forgé	»	19065
Argent à 12 deniers, fondu, forgé	»	11494
Platine passé à la filière	»	21039
Cuivre — rouge fondu	»	7783
Cuivre — passé à la filière	»	8540
Cuivre — jaune, laiton fondu	»	12674
Cuivre — passé à la filière	»	8540
Fer — fondu	»	7202
Fer — forgé	»	7783
Acier — non trempé	»	7829
Acier — écroui, trempé	»	7813
Étain — pur de Cornwall, fondu	»	7287
Étain — neuf, fondu, écroui	»	7307
Étain — fin, fondu, écroui	»	7515
Étain — commun fondu	»	7915
Étain — dit *clair étoffe*, fondu	»	8439
Fonte blanche	»	7500
Id. grise	»	7200
Id. noire	»	7260
Plomb fondu	»	11348
Zinc fondu	»	7138
Mercure coulant	»	13560
3° *Carreaux de plâtras et plâtre.*	Un carreau humide.	Un carreau sec.
Pour cloisons légères, $0^{m}.487$ sur $0^{m}.325$ et $0^{m}.0677$ d'épaisseur	15	12
Pour cloisons légères, $0^{m}.487$ sur $0^{m}.325$ et 0 .0812 id.	18	15
Pour cloisons légères, $0^{m}.487$ sur $0^{m}.325$ et 0 .0947 id.	21	17
Pour cloisons légères, $0^{m}.487$ sur $0^{m}.325$ et 0 .1083 id.	23	20
Long. Larg. Épaiss.	Le cent de compte.	
Briques de Bourgogne — $0^{m}.226$ 0.108 0.054	241	428
Briques de Montereau — 0 .217 0.108 0.050	208	214
Briques de Sarcelles — 0 .210 0 088 0.047	180	184
Brique flottante composée de farine volcanique — 0. 189 0.115 0.045	44	»
Ardoise carrée forte	45	47
Id. *id.* fine	36	38
Id. cartelette	22	23
Le mètre carré de voliges employé en couverture	5	5,3
Tuiles de Bourgogne, grand moule de $0^{m}.298$ sur 0.244 et 0.0135	223	225
Tuiles de Bourgogne, grand moule faîtières de $0^{m}.352$	379	385
Id. petit moule de $0^{m}.244$ sur 0.162 et 0.014	159	162
Id. petit moule faîtières de $0^{m}.352$	328	380
Tuiles de Sarcelles de $0^{m}.257$ sur 0.162 et 0.018	112	116
Id. faîtières de $0^{m}.325$	»	245

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube.	
	de	à
	kil.	kil.
Carreaux de 0m.162, à six pans, de { Bourgogne.	84	»
Carreaux de 0m.162, à six pans, de { Sarcelles.	74	»
4° Bois.		
Abricotier.	771	»
Acacia (faux).	785	806
Alisier.	871	885
Acajou.	785	914
Amandier.	116	»
Arbre de Judée.	685	»
Aune.	510	800
Bouleau commun.	700	714
Id. merisier.	571	»
Buis de France.	900	914
Id. de Mahon.	914	928
Id. de Hollande.	1314	1328
Catalpa.	457	471
Cèdre du Liban.	557	606
Id. des Indes.	1314	»
Cerisier commun.	714	743
Id. de Sainte-Lucie.	857	871
Charbon de bois.	336	»
Charme.	757	»
Châtaignier.	685	1166
Chêne vert.	936	1226
Chêne sec.	643	1015
Coguassier.	760	985
Cormier.	900	914
Coudrier noisetier.	600	»
Cyprès pyramidal.	606	657
Id. étalé.	571	»
Ébénier des Alpes.	1042	»
Id. d'Amérique.	1199	1328
Érable sycomore.	643	»
Id. de Virginie.	628	757
Id. jaspé.	543	557
Févier épineux.	814	828
Id sans épines.	771	785
Frêne.	785	»
Gaïac.	1328	1342
Genévrier.	543	557
Grenadier.	1342	1357
Hêtre.	714	857
If de Hollande.	771	»
If d'Espagne	814	»
Laurier d'Espagne.	814	828
Marronnier.	657	»
Mélèze.	657	»
Mûrier.	885	960
Néflier.	942	»
Noyer de France.	666	685
Noyer d'Afrique.	728	743
Olivier.	914	928

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube.	
	de	à
	kil.	kil.
Oranger.	700	»
Orme.	743	942
Osier.	543	»
Peuplier d'Italie.	371	414
Id. de Hollande.	528	614
Pin du Nord.	814	828
Platane d'Orient.	700	714
Id. d'Occident.	628	»
Poirier.	600	714
Pommier.	757	800
Prunier.	711	790
Sapin abies.	460	»
Id. épicéa.	528	557
Id. jaune aurore.	671	»
Saule.	571	585
Sorbier des oiseleurs.	743	»
Sureau.	685	700
Sycomore.	640	»
Tilleul.	557	600
Tulipier.	471	485
Thuya de la Chine.	557	571
Aylande, dit *vernis du Japon*.	814	828
Vigne.	1314	1328
Cordes en chanvre, environ.	915	»

MACHINES EN GÉNÉRAL.

46. Une *machine* est un système matériel composé de différents corps ou organes tellement reliés entre eux, que tout mouvement de l'un, compatible avec la solidité du système, entraîne des mouvements relatifs déterminés pour chacun des autres.

Les mouvements relatifs des différents organes d'une machine ne sont pas seulement déterminés en direction, mais aussi en intensité. Généralement les mouvements sont périodiques uniformes (8), et la vitesse est mise en harmonie avec les besoins des travaux industriels à produire, sans que jamais elle atteigne la limite à laquelle la solidité de la machine serait compromise.

47. Sur une machine en mouvement agissent différentes forces que l'on peut diviser en trois classes :

1° *Les forces mouvantes ou motrices.* Ce sont les forces qui agissent dans le sens du mouvement des organes qu'elles sollicitent ; c'est par conséquent à elles qu'est dû le mouvement de la machine ;

2° *Les résistances utiles.* Ce sont les forces que les matières sur lesquelles opère la machine opposent au mouvement des organes qui les sollicitent ;

3° *Les résistances passives ou nuisibles.* Ce sont les forces qui naissent du mouvement des différents organes de la machine pour s'opposer à ce mouvement ; elles sont dues au frottement de ces organes entre eux ou sur des corps étrangers, aux chocs qui peuvent avoir lieu entre ces organes par suite de changements brusques de vitesse ou de direction, à la roideur des cordes ou courroies, etc.

48. Considérant les forces motrices comme positives, puisqu'elles agissent dans le sens du mouvement, les résistances utiles et les résistances nuisibles sont négatives. Par conséquent si on suppose le système animé d'un mouvement uniforme, la somme des travaux de toutes les forces pour un temps quelconque sera nulle, puisque le gain ou la perte de puissance vive est nulle, et on aura (30 et *Int.* 1195)

$$\mathcal{T}_m - \mathcal{T}_u - \mathcal{T}_n = 0 \quad \text{ou} \quad \mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

Ce qui fait voir que, *le mouvement étant uniforme, le travail moteur* $\mathcal{T}_m$, *dû aux forces motrices, est égal au travail utile* $\mathcal{T}_u$, *dû aux résistances utiles, plus le travail nuisible* $\mathcal{T}_n$, *dû aux résistances passives.*

Réciproquement. Si à chaque instant cette équation subsiste, le mouvement est uniforme ; car la vitesse ne peut varier qu'autant que la somme des travaux de toutes les forces n'est pas nulle.

Lorsque, dans une machine, cette formule existe, on dit qu'il y a équilibre dynamique.

Quand le mouvement de la machine est uniforme périodique, le gain ou la perte de puissance vive pendant un certain temps n'est nul que pour la durée d'un nombre entier de périodes ; pour ce temps, on a encore

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

On dit alors que la machine est en *équilibre dynamique périodique :* c'est l'état ordinaire des machines, non-seulement à cause de la forme de leurs organes, mais aussi à cause des variations plus ou moins grandes des forces motrices et surtout des résistances.

49. *Impossibilité du mouvement perpétuel.* Dans le cas où on néglige les résistances passives, la formule précédente devient

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u.$$

Ce qui fait voir que le travail utile $\mathcal{T}_u$ *est égal au travail moteur* $\mathcal{T}_m$.

Il est impossible de réaliser ce résultat dans la pratique ; car, dans une machine quelconque, il y a toujours des résistances passives qui diminuent le travail utile.

Le travail nuisible, inévitable, des résistances passives fait voir l'impossibilité d'obtenir le mouvement perpétuel. Que cette vérité n'a-t-elle été mieux répandue plus tôt, et que ne l'est-elle davantage encore au-

ourd'hui ; elle aurait évité et éviterait bien des déceptions à de pauvres malheureux qui croient ce mouvement réalisable !

Il est évident que s'il n'y avait pas de résistances passives, c'est-à-dire si on avait $T_m = T_u$, on pourrait obtenir le mouvement perpétuel ; puisque, par exemple, à l'aide d'une quantité d'eau tombant d'une certaine hauteur, on pourrait en élever une même quantité à la même hauteur ; celle-ci pourrait ensuite faire monter la première à la même hauteur, puis la première élever la seconde, et ainsi de suite indéfiniment. Un pendule écarté de la verticale oscillerait indéfiniment sans la résistance de l'air et le frottement de son axe de suspension.

50. P étant la force motrice agissant sur une machine quelconque, et Q la résistance utile vaincue par cette machine, E et e étant les espaces parcourus par les points d'application de P et Q dans les directions de ces forces et dans un même temps quelconque, au commencement et à la fin duquel la vitesse de la machine est la même, l'équation d'équilibre dynamique donne, en supposant nulles les résistances passives,

$$P \times E = Q \times e \text{ ou } P : Q :: e : E.$$

Ce qui permet de calculer l'une quelconque des quatre quantités **P, Q, E, e**, quand on connaît les trois autres.

Ainsi, on a une machine quelconque, simple ou compliquée, et il s'agit de déterminer quelle sera la résistance Q que pourra vaincre une puissance P. Pour cela, on détermine les espaces E et e parcourus dans le même temps par les points d'application des forces P et Q. E et e sont quelconques si ces points d'application ont des mouvements uniformes ; mais on les prend correspondants à un nombre entier de périodes si le mouvement de la machine est périodique. Lorsque la machine est construite, c'est en la mettant en mouvement d'une manière quelconque que l'on détermine les valeurs de E et e ; lorsqu'elle n'est qu'en dessin, d'une valeur de E on déduit celle de e d'après les rapports des espaces parcourus par les différents organes qui transmettent le mouvement du point d'application de P à celui de Q.

Supposons que la résistance à vaincre $Q = 100^k$; il s'agit de déterminer quelle sera la puissance P en négligeant les résistances passives.

On détermine les valeurs correspondantes de E et e en opérant comme il vient d'être indiqué, soit $E = 2^m,5$ et $e = 0^m,80$; puis on remplace les lettres par leurs valeurs dans la proportion précédente, ce qui donne

$$P : 100^k :: 0,80 : 2,5, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{100 \times 0,80}{2,5} = 32^k.$$

Pour avoir la force théorique en chevaux-vapeur (35), on constate le temps pendant lequel les espaces E et e sont parcourus quand la machine est en marche normale, et les produits égaux $P \times E$ et $Q \times e$

donnent chacun le nombre de kilogrammètres produit par P ou absorbé par Q dans ce temps; divisant ce nombre de kilogrammètres par ce temps exprimé en secondes, on a la puissance de la machine en kilogrammètres par seconde. Ce nombre de kilogrammètres divisé par 75 donne la puissance de la machine en chevaux. Si dans l'exemple précédent E et e sont parcourus en 1'',5, $P \times E = 32 \times 2,5 = Q \times e = 100 \times 0,80 = 80^{km}$ est le nombre de kilogrammètres produit et absorbé en 1'',5; $\frac{80}{1,5} = 53^{km},33$ est la puissance de la machine en kilogrammètres par seconde, et $\frac{53.33}{75} = 0,71$ est sa puissance en chevaux-vapeur.

Si l'on avait donné la puissance P, on aurait déterminé Q en opérant comme ci-dessus.

51. Souvent dans la pratique on a la puissance dont on peut disposer en chevaux; supposons qu'elle soit de 25 chevaux. Pour calculer P et Q, on commence par déterminer $E = 3^m$ et $e = 0^m,8$, en opérant comme il a été indiqué (50). La durée de ces parcours étant 1'',4, le travail produit par la machine dans ce temps est de $75 \times 25 \times 1,4 = 2625^{km}$; on a donc

$$P \times E = P \times 3 = 2625, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{2625}{3} = 875^k.$$

Ayant P, on peut calculer Q à l'aide de la proportion du n° 50. Du reste on a encore

$$Q \times e = Q \times 0,8 = 2625, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2625}{0,8} = 3281^k,25.$$

52. Il peut arriver qu'au lieu d'avoir une force motrice unique, on en ait plusieurs P, P', P''..... et que l'on ait aussi plusieurs résistances utiles Q, Q', Q''..... Constatant, comme pour deux forces, les espaces E, E', E''..... et e, e', e''..... parcourus dans le même temps par les points d'application des forces dans le sens de ces forces, l'équation

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u \ (49),$$

au lieu de fournir l'équation du n° 50, donne

$$P \times E + P' \times E' + P'' \times E'' + \ldots.. = Q \times e + Q' \times e' + Q'' \times e'' + \ldots..$$

Équation à l'aide de laquelle on déterminera une des quantités qui y entrent, connaissant toutes les autres. Les membres de cette équation donnent chacun le travail théorique produit ou absorbé pendant la durée du parcours des espaces correspondants E, E'..... e, e'..... Connaissant cette durée, on détermine en kilogrammètres le travail théorique produit ou absorbé pendant une seconde, et ce dernier travail divisé par 75 donne la puissance en chevaux-vapeur (35). Si l'on avait d'abord



donné la puissance en chevaux, par des calculs inverses à ceux que nous venons d'indiquer, le problème aurait fourni, soit pour P, P'... E, E'...., soit pour Q, Q'... e, e'..., une infinité de valeurs satisfaisant à l'équation; mais les valeurs choisies auraient toujours dû donner, pour le premier et pour le deuxième membre de l'équation, une valeur correspondant à 25 chevaux ou $25 \times 75 = 1875^{km}$ par seconde.

53. Dans les machines, surtout dans les machines industrielles, les résistances passives sont assez considérables pour que l'on ne puisse négliger le travail qu'elles absorbent; l'équilibre dynamique est alors exprimé par

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

Pour un certain déplacement de la machine, les travaux $\mathcal{T}_m$, $\mathcal{T}_u$ et $\mathcal{T}_n$ s'évaluent comme dans le cas précédent; ainsi, P étant la puissance, Q la résistance utile, R, R'... les différentes résistances passives, et E, e, i, i'... les espaces correspondants parcourus dans le même temps par les points d'application dans le sens de ces forces, on a

$$P \times E = Q \times e + R \times i + R' \times i' + \dots$$

Équation qui revient à celle du n° 52, dans laquelle on aurait remplacé différentes résistances utiles par des résistances nuisibles.

Il peut arriver qu'une ou plusieurs résistances nuisibles proviennent de chocs entre les organes de la machine. Le travail absorbé par ces résistances n'est plus évalué par un produit d'une force par l'espace que parcourt son point d'application, mais par la perte de puissance vive due au choc, et cette perte, évaluée en kilogrammètres (97), entre dans le second membre de l'équation comme tous les autres travaux nuisibles $R \times i$, $R' \times i'$...

A l'aide de l'équation précédente, connaissant, dans une machine, deux des trois travaux suivants : le travail moteur $\mathcal{T}_m = P \times E$, le travail utile $\mathcal{T}_u = Q \times e$, et le travail nuisible $\mathcal{T}_n = R \times i + R' \times i' + \dots$, on détermine le troisième.

54. On se propose ordinairement d'établir une machine capable de produire un travail utile $\mathcal{T}_u = Q \times e$ donné. Il faut alors déterminer $\mathcal{T}_m = P \times E$ capable de produire non-seulement ce travail utile, mais aussi le travail nuisible. Il faut donc que l'on commence par calculer ce travail nuisible; ce que l'on fait en déterminant les valeurs des différentes résistances nuisibles R, R'..... en fonction de Q, et par suite $\mathcal{T}_n$ en fonction de $\mathcal{T}_u$.

Ayant $\mathcal{T}_u$ et $\mathcal{T}_n$, l'équation du n° 53 donne $\mathcal{T}_m$, et l'on peut déterminer le travail moteur en chevaux comme au n° 52.

55. Le travail moteur $\mathcal{T}_m$ étant représenté par 100, et les travaux utile $\mathcal{T}_u$ et nuisible $\mathcal{T}_n$ étant, par exemple, 75 et 25, on dit que le rendement est de 75 pour cent; la perte est alors de 25 pour cent. S'il était possible que la perte fût nulle, le rendement serait de 100 pour cent.

56. *Remarque.* Ce qui vient d'être exposé fait voir l'importance que joue la formule de l'équilibre dynamique dans l'établissement des machines. Que de procès souvent désastreux sont dus à ce que cette formule n'ayant pas été convenablement comprise, des machines établies n'ont pas produit le travail qu'on en attendait.

Au point où l'on en est aujourd'hui, la pratique a prononcé sur la quantité de travail nuisible T_n qui a lieu dans les différentes machines industrielles, et on se base généralement sur ces résultats dans les constructions nouvelles, tout en cherchant à diminuer cette perte autant que possible.

Il y a cependant des cas où il peut être nécessaire de se rendre compte de cette perte; c'est pourquoi nous allons étudier les différentes résistances passives, et poser ensuite les équations d'équilibre dynamique des différentes machines simples; équations desquelles on passera facilement à celles des machines les plus compliquées, qui ne sont en général que la réunion d'un certain nombre de ces machines simples.

FROTTEMENT.

57. La surface d'un corps n'étant jamais parfaitement unie, quel que soit son poli, il en résulte que quand on met deux surfaces en contact, elles se pénètrent toujours plus ou moins. Cet enchevêtrement n'est pas seulement dû à l'imperfection du poli des pièces, mais aussi à ce que les surfaces en contact se pressant mutuellement, il y a une déformation d'autant plus grande que les corps sont moins durs et que la pression de l'un sur l'autre est plus considérable.

De l'enchevêtrement des molécules de deux surfaces en contact, il résulte que si l'on imprime un mouvement à l'un des corps, mais de manière à le laisser toujours en contact avec la surface de l'autre corps, il naît une résistance qui s'oppose directement au mouvement, et à laquelle on donne le nom de *frottement.*

Si la même partie de la surface d'au moins un des corps reste toujours en contact, c'est-à-dire s'il y a glissement d'un ou de chacun des corps sur l'autre, le frottement prend le nom de *frottement de glissement.* Si au contraire les parties des surfaces en contact varient à chaque instant, comme dans le mouvement d'une bille sur un tapis de billard, ou d'une roue de voiture sur une route, le frottement prend le nom de *frottement de roulement.*

58. L'expérience prouve que le frottement est proportionnel à la pression normale que les surfaces exercent l'une sur l'autre, qu'il varie selon la nature et l'état des surfaces en contact, et qu'il est indépendant de la vitesse et de l'étendue de ces surfaces.

En lubréfiant les surfaces en contact avec des corps onctueux, tels que la graisse, le savon..... on diminue considérablement le frottement, et



d'autant plus que l'enduit est renouvelé avec plus de continuité. L'eau pure est un mauvais enduit, surtout pour les métaux; souvent même elle augmente le frottement.

Nous venons de dire que le frottement est proportionnel à la pression des surfaces entre elles; mais cela n'a lieu que jusqu'à une certaine limite; au delà, les surfaces s'entament, et le frottement devient considérable sans varier suivant aucune loi. Les corps onctueux, tout en diminuant le frottement, reculent considérablement la limite à laquelle les surfaces s'entament.

D'après les expériences de Wood, la pression des essieux de waggons dans leurs boîtes ne doit pas dépasser $6^k,33$ par centimètre carré de surface de contact; au-dessus de cette limite, la graisse qui lubréfie les surfaces est écrasée et chassée; alors, les corps frottant à sec, ils s'entament, et le frottement devient considérable.

L'expérience prouve aussi que quand deux surfaces ont été en contact et en repos relatif pendant un certain temps, le frottement de glissement est plus considérable au premier instant du mouvement que quand le mouvement a lieu. Cela est d'autant plus sensible que la pression est plus grande, et que les corps sont plus compressibles; ces deux circonstances tendent à faire pénétrer les surfaces et à chasser l'enduit.

59. Le rapport entre le frottement F, résistance qui s'oppose directement au mouvement, et la pression P qui s'exerce normalement entre les deux surfaces en contact, est ce que l'on appelle *coefficient de frottement;* ainsi, désignant ce coefficient par f, on a

$$f=\frac{F}{P}, \text{ d'où } F=fP \text{ et } P=\frac{F}{f}.$$

Pour $P=500^k$ et $f=0,08$, on a $F=0,08\times 500=40$ kil.

Ces formules s'appliquent au premier instant du mouvement, après quelque temps de repos, comme pendant le mouvement; seulement F et f ont d'autres valeurs (60 et 62).

L'expérience prouvant qu'un léger choc, donné sur les corps en contact depuis un certain temps, produit un ébranlement suffisant pour faire commencer le mouvement quand le corps mobile est sollicité par un effort de très-peu supérieur à celui qui est capable de le continuer, dans les applications, pour évaluer le travail absorbé par le frottement, on ne tient compte que du frottement qui s'exerce quand les corps sont déjà en mouvement. On ne tient compte non plus que de ce frottement dans l'évaluation de la stabilité d'une construction soumise à des ébranlements.

Le frottement de roulement, sur lequel nous reviendrons au sujet des chemins de fer, peut être négligé, comparativement au frottement de glissement, quand il s'exerce entre quelques organes d'une machine industrielle (*Int.*, 1210 et suivants).

60. *TABLEAU des valeurs du coefficient de frottement des surfaces planes* (59), *d'après les expériences de M. Morin.*

INDICATION DES SURFACES FROTTANTES.	DISPOSITION des fibres	ÉTAT des surfaces.	RAPPORT du frottement à la pression.	
			au départ, après quelque temps de contact.	pendant le mouvement.
Chêne sur chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	0.62	0.48
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	0.44	0.16
Id. *id.*	Perpendiculaires.	Sans enduit.	0.54	0.34
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	0,71	0.25
Id. *id.*	Bout sur plat.	Sans enduit.	0.43	0.19
Chêne sur orme.	Parallèles.	*Id.*	0.38	»
Orme sur chêne.	*Id.*	*Id.*	0.69	0.43
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	0.41	0.25
Id. *id.*	Perpendiculaires.	Sans enduit.	0.57	0.45
Frêne, sapin, hêtre, sorbier sur chêne.	Parallèles.	*Id.*	0.53	0.36 à 0.40
Fer sur chêne.	*Id.*	*Id.*	0.62	0.62
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	0.65	0.26
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	»	0.21
Fonte sur chêne.	*Id.*	Sans enduit.	»	0.49
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	0.65	0.22
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	»	0.19
Cuivre jaune sur chêue.	*Id.*	Sans enduit.	0.62	0.62
Fer sur orme.	*Id.*	*Id.*	»	0.25
Fonte sur orme.	*Id.*	*Id.*	»	0.20
Cuir tanné sur chêne.	Cuir à plat.	Sans enduit.	0.61	0.30 à 0.35
Id. *id.*	Cuir de champ.	*Id.*	0.43	0.30 à 0.35
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	0.79	0.29
Id. *id.*	Cuir à plat.	*Id.*	»	0.29
Cuir noir corroyé ou courroie, sur une surface plane en chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	0.74	0.27
Id. *id.* sur tambour en chêne.	Perpendiculaires.	*Id.*	0.47	»
Cnir tanné sur fonte et aur bronze.	A plat on de champ.	*Id.*	»	0.56
Id. *id.* *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	»	0.36
Id. *id.* *id.*	*Id.*	Onctueuses et ean.	»	0.23
Id. *id.* *id.*	*Id.*	Huilées.	»	0.15
Cuir de bœuf pour garniture de piston, sur fonte.	*Id.*	Mouillées d'ean.	0.62	»
Id.	*Id.*	Huile, suif, saindoux.	0.12	»
Cuir noir corroyé sur poulie en fonte.	Cnir à plat.	Sans enduit.	0.28	»
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'ean.	0.38	»
Chanvre en brin ou en corde sur chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	»	0.52
Id.	Perpendiculaires.	Mouillées d'ean.	»	0.33
Natte de chanvre sur chêne.	Parallèles.	Sans endnit.	0.50	»
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	0.87	»
Chêne et ortue sur fonte.	*Id.*	Sans endnit.	»	0.38
Poirier sauvage aur fonte.	*Id.*	*Id.*	»	0.44

INDICATION DES SURFACES FROTTANTES.	DISPOSITION des fibres.	ÉTAT des surfaces.	RAPPORT du frottement à la pression. au départ, après quelque temps de contact.	RAPPORT du frottement à la pression. pendant le mouvement
Fer sur fer.	»	Sans enduit.	»	»[1]
Fer sur fonte.	»	*Id.*	0.19	0.18[2]
Fer sur bronze.	»	*Id.*	»	0.18[2]
Foote sur fonte.	»	*Id.*	16[a]	0.15[2]
Fonte sur bronze.	»	*Id.*	»	0.15[2]
Bronze sur bronze.	»	*Id.*	»	0.20
Id. sur fonte.	»	*Id.*	»	0.22
Id. sur fer.	»	*Id.*	»	0.16[3]
Chêne, orme, poirier sauvage, fonte, fer, acier et bronze, glissant l'un sur l'autre ou sur eux-mêmes.	»	Lubréfiées à la manière ordinaire, de suif, d'huile, de saindoux ou de cambouis mou.	»	0.07 à 0.08
Les mêmes. *Id.*	»	Légèrement onctueuses au toucher.	»	0.15
Chêne, orme, charme, fer, foote et bronze, glissant deux à deux l'un sur l'autre.	»	Enduites de suif.	0.10[b]	»
Les mêmes. *Id.*	»	*Id.* d'huile ou de saindoux.	0.15[c]	»
Calcaire tendre, dit calcaire oolithique, bien dressé sur lui-même.	»	Sans enduit.	0.74	0.64
Calcaire dur, dit muschelkalk, bien dressé sur calcaire oolithiqoe.	»	*Id.*	0.75	0.67
Brique ordinaire sur calcaire oolithique.	»	*Id.*	0.67	0.65
Chêne sur calcaire oolithique.	Bois de bout.	*Id.*	0.63	0.38
Fer forgé. *Id.*	Parallèles.	*Id.*	0.49	0.69
Muschelkalk sur muschelkalk.	»	*Id.*	0.70	0.38
Calcaire oolithique sur muschelkalk.	»	*Id.*	0.75	0.65
Brique ordinaire sur muschelkalk.	»	*Id.*	0.67	0.60
Chêoe sur muschelkalk.	Bois de bout.	*Id.*	0.64	0.38
Fer forgé sur muschelkalk.	Parallèles.	*Id.*	0.42	0.24
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau.	»	0.30
Calcaire oolithique sur calcaire oolithique.	»	Mortier de trois parties de sable fin et une partie de chaux hydraulique.	0.74[d]	»

a les surfaces conservant quelque onctuosité;
b lorsque le contact o'a pas duré assez longtemps pour exprimer l'enduit;
c lorsque le contact a duré assez longtemps pour exprimer l'enduit, et ramener les surfaces à l'état onctueux;
d après un contact de 10 à 15 minutes;
[1] les surfaces se rodant dès qu'il n'y a pas d'endoit;
[2] les surfaces conservant encore un peu d'onctuosité;
[3] les surfaces étant uo peu onctueuses;
[4] lorsque l'enduit est sans cesse renouvelé et uniformément réparti, ce rapport peut s'abaisser jusqu'à 0.05.

61. Le tableau suivant, extrait de l'*Introduction à la mécanique industrielle* de M. Poncelet, complète le précédent.

TABLEAU des résistances au glissement, à l'instant du départ et après quelque temps de contact.

PREMIÈRE PARTIE. — *Frottement proprement dit.*

NATURE DES CORPS ET ENDUITS.	OPÉRATEURS.	RAPPORT du frottement à la pression.
Grès uni sur grès uni, à sec.	Rennie.	0.71
Id. *id.* avec mortier frais.	*Id.*	0.66
Calcaire dur poli sur calcaire dur poli.	Rondelet.	0.58
Id. bouchardé *id.* bouchardé.	Boistard.	0.78
Granit bien dressé sur granit bouchardé.	Rennie.	0.66
Id. avec mortier frais sur granit bouchardé.	*Id.*	0.49
Caisse en bois sur pavé.	Régnier.	0.58
Id. sur la terre battue.	Hubert.	0.33
Pierre de libage sur un lit d'argile sèche.	Lesbros.	0.51
Id. l'argile étant humide et ramollie.	*Id.*	0.34
Id. l'argile pareillement humide, mais recouverte de grosse grève.	*Id.*	0.40

DEUXIÈME PARTIE. — *Cohésion ou adhérence* (*).

NATURE des pièces superposées et de l'enduit.	OPÉRATEURS.	SURFACE en décimètres carrés.	JOURS de contact à l'air ou dans l'eau.	RÉSISTANCE moyenne par mètre carré.
Calcaire bouchardé, fiché sur calcaire bouchardé, avec mortier en chaux grasse et sable fin.	Boistard.	1 à 2 3 à 5 47	17 à l'air. *id.* 48 à l'eau.	6600 k. 9400 1200
Le même, avec mortier en chaux grasse et ciment.	*Id.*	1 à 2 3 à 5	17 à l'air. *id.*	3200 5300
Le même, avec mortier en chaux grasse et ciment, non rompu.	*Id.*	47	48 à l'eau.	1100
Calcaire tendre de Jaumont, fiché sur calcaire tendre de Jaumont, avec mortier en chaux hydraulique de Metz et sable fin.	Morin.	1 à 2 2 à 3 *Id.* 4 à 6 7 à 8	83 à l'air. 48 *id.* 43 *id.* 48 *id.* 48 *id.*	18000 12000 10100 10000 9400
Briques ordinaires, fichées avec le même mortier.	*Id.*	1.3 2.6	48 *id.* 48 *id.*	14000 10000
Calcaire de Jaumont, fiché sur calcaire de Jaumont, avec plâtre ordinaire.	*Id.*	2.0 8.0	48 *id.* 48 *id.*	22000 28000
Calcaire bleu à gryphite très-lisse, sur calcaire bleu à gryphite très-lisse, avec plâtre.	*Id.*	2.5 4.5	48 *id.* 48 *id.*	11000 20000

(*) La rupture ayant lieu dans l'intérieur de la couche de mortier, ou à la jonction de la couche de plâtre avec les pierres, la résistance est due à la cohésion dans le premier cas, et à l'adhérence dans le second.

62. *TABLEAU des valeurs du coefficient de frottement des axes en mouvement sur leurs coussinets* (59).

1° D'après M. Morin.

Indication des axes.	Indication des coussinets.	Nature des enduits.	Rapport du frottement à la pression. Graissage ordinaire.	Rapport du frottement à la pression. Graissage continu.
Fonte.	Fonte.	Huile d'olive, saindoux, suif ou cambouis mou.	0.07 à 0.08	0.054
Id.	*Id.*	Les mêmes enduits, et les surfaces mouillées d'eau.	0.08	»
Id.	*Id.*	Asphalte.	0.054	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses.	0.14	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses et mouillées d'eau.	0.14	»
Id.	Bronze.	Huile d'olive, saindoux, suif ou cambouis mou.	0.07 à 0.08	0.054
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses.	0.16	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses et mouillées d'eau.	0.16	»
Id.	*Id.*	Surfaces très-peu onctueuses. . . .	0.19	» [a]
Id.	Gayac.	Sans enduit.	0.18	» [b]
Id.	*Id.*	Huile ou saindoux.	»	0.090
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses d'huile ou de saindoux.	0.10	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses d'un mélange de saindoux et de plombagine. .	0.14	»
Fer.	Fonte.	Huile d'olive, suif, saindoux ou cambouis mou.	0.07 à 0.08	0.054
Id.	Bronze.	Huile d'olive, saindoux ou suif. . .	0.07 à 0.08	0.054
Id.	*Id.*	Cambouis ferme.	0.09	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses et mouillées d'eau.	0.19	»
Id.	*Id.*	Surfaces très-peu onctueuses. . . .	0.25	» [c]
Id.	Gayac.	Huile ou saindoux.	0.11	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses.	0.19	»
Bronze.	Bronze.	Huile.	0.10	»
Id.	*Id.*	Saindoux.	0.09	»
Id.	Fonte.	Huile ou suif.	»	0.045 à 0.052
Gayac.	*Id.*	Saindoux.	0.12	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses.	0.15	»
Id.	Gayac.	Saindoux.	»	0.07

a les surfaces commençant à se roder;
b les bois étant un peu onctueux;
c les surfaces commençant à se roder.

2° D'après Coulomb.			
Indication des axes.	Indication des coussinets.	Nature des enduits.	Rapport du frottement à la pression.
Fer.	Cuivre.	Sans enduit.	0.155
Id.	*Id.*	Suif.	0.085
Id.	*Id.*	Saindoux.	0.120
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé. . . .	0.127
Id.	*Id.*	Huile d'olive.	0.130
Id.	*Id.*	Surfaces anciennement enduites de suif.	0.133
Chêne vert.	Gayac.	Suif.	0.038
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé. . . .	0.060
Id.	*Id.*	Surfaces anciennement enduites de suif.	0.070
Id.	Orme.	Suif.	0.030
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé. . . .	0.050
Buis.	Gayac.	Suif.	0.043
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé. . . .	0.070
Id.	Orme.	Suif.	0.035
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé. . . .	0.050
Fer.	Bois.	On ne désigne pas la nature des enduits.	0.050

63. Les formules suivantes donnent successivement l'expression du travail absorbé par le frottement (27 et 59) : 1° d'un corps qui se meut sur une surface plane, pour un espace quelconque parcouru ; 2° d'un axe qui tourne dans un coussinet, pour une révolution (*Int.*, 1249) ; 3° de la face horizontale d'un pivot vertical tournant sur une crapaudine, aussi pour une révolution (*Int.*, 1250) ; 4° d'une couronne ou collet tournant en frottant par une face normale à son axe (*Int.*, 1251).

$$\mathcal{T}=f\mathrm{PE},\quad \mathcal{T}=f\mathrm{P}\times 2\pi r,\quad \mathcal{T}=f\mathrm{P}\frac{4}{3}\pi r,\quad \mathcal{T}=f\mathrm{P}\times 2\pi\left(\rho+\frac{1}{12}\frac{l^2}{\rho}\right).$$

$\mathcal{T}$ travail absorbé par le frottement ;
f coefficient de frottement (59) ;
P pression qui s'exerce entre les deux surfaces frottantes ;
E espace parcouru par une surface sur l'autre ;
r rayon du tourillon, de la face horizontale du pivot, et de l'extérieur de la couronne ;
r' rayon intérieur de la couronne ;
$\rho=\frac{r+r'}{2}$ rayon moyen *id.*
$l=r-r'$ largeur de la couronne ;

Application. Soit à déterminer, pour une révolution, le travail absorbé par le frottement du collet d'un arbre en fonte graissé d'huile, contre la joue latérale d'un coussinet en bronze ; la pression P du collet contre la joue du coussinet étant de 55 kilog., le grand rayon r ayant $0^m,06$, et le petit r', $0^m,05$.

On a $\rho = \frac{0,06+0,05}{2} = 0^m,055, \quad l = 0,06 - 0,50 = 0^m,01,$

et, d'après le tableau (60) $f = 0,08.$

Remplaçant alors les lettres par leurs valeurs dans la formule 4°, on a

$$\mathfrak{T} = 0,08 \times 55 \times 2 \times 3,14 \left(0,055 + \frac{1}{12} \times \frac{(0,01)^2}{0,055}\right) =$$
$$27,63\ (0,055 + 0,00015) = 1^{km},52.$$

Supposant que l'arbre fasse une révolution par seconde, on voit que le travail absorbé par le frottement est à peu près le 1/4 de celui produit par un homme agissant sur une manivelle (36).

64. *Le frottement produit par la garniture d'un piston, et le travail absorbé par ce frottement pour un coup de piston* sont successivement :

$$F = \pi Depf, \quad \text{et} \quad \mathfrak{T} = \pi Depfl,$$

F frottement ;
D diamètre du piston ;
e hauteur de la garniture ;
p pression sur un mètre carré de surface de la partie frottante de la garniture ; c'est la pression du liquide ou du gaz comprimé sur la même unité de surface ;
f coefficient de frottement ; il varie de 1/8 à 1/10 pour les garnitures de cuivre enduites sur fonte ; il est 1/6 pour les garnitures en chanvre, et 1/5 pour celles en cuir enduites de plombagine ;
$\mathfrak{T}$ travail absorbé par le frottement pour une course de piston ;
l course du piston.

CORDES ET COURROIES.

65. *Roideur des cordes.* Lorsqu'on vainc une résistance Q au moyen d'une corde qui s'enroule sur une poulie ou sur un tambour, la puissance P doit, pour l'équilibre dynamique, vaincre non-seulement la résistance Q et le frottement des tourillons, mais aussi une résistance due à la roideur de la corde, et dont l'effet consiste à infléchir la corde.

Appelant R cette résistance, ou mieux la force qui, d'après les expériences, agissant à très-peu près tangentiellement au cylindre sur lequel s'enroule la corde, fait équilibre à cette résistance, l'équilibre dynamique donnera, pour un tour de poulie, en négligeant les frottements et en appelant D le diamètre de la poulie et d celui de la corde,

$$\mathfrak{T}_m = P \times \pi(D+d) = Q \times \pi(D+d) + R \times \pi D, \text{ d'où } P = Q + R\frac{D}{D+d}.$$

Coulomb a fait quelques expériences pour déterminer la valeur de R.



Navier, de la discussion des résultats obtenus par cet expérimentateur, a conclu l'expression suivante pour la valeur de R,

$$R = \frac{1}{D}(ad^{\mu} + bd^{\mu}Q). \qquad (a)$$

ad^{μ} quantité constante pour une même corde;
$bd^{\mu}Q$ quantité proportionnelle au poids élevé;
μ nombre qui varie avec l'usé de la corde.

Les expériences de Coulomb sont insuffisantes pour fixer la loi de variation de μ; cependant Navier fait $\mu = 2$ pour les cordes neuves d'un grand diamètre, $\mu = 1,5$ pour les cordes plus qu'à demi usées, et $\mu = 1$ pour les ficelles très-petites et très-flexibles (*Int.*, 428 et suivants).

Navier a admis (ce que ne confirme pas le tableau suivant dû aux expériences de Coulomb) que pour une même résistance utile Q, la résistance due à la roideur d'une corde blanche varie en raison inverse du diamètre de la poulie ou du tambour, et qu'elle est directement proportionnelle à la puissance μ du diamètre de la corde.

De cette hypothèse, il résulte que pour deux cordes de diamètres différents, s'enroulant sur deux poulies de diamètres inégaux, et élevant les mêmes poids, on a

$$R' = R\frac{D}{D'}\left(\frac{d'}{d}\right)^{\mu}; \qquad (b)$$

R' résistance due à la roideur de la corde de diamètre d', s'enroulant sur la poulie dont le diamètre est D';
R résistance due à la roideur de la corde de diamètre d, s'enroulant sur la poulie dont le diamètre est D.

Pour les cordes goudronnées, la roideur ne varie pas sensiblement avec le degré d'usé, et il est plus exact de remplacer dans la formule précédente le rapport $\frac{d'^{\mu}}{d^{\mu}}$ par celui $\frac{n'}{n}$, n' et n exprimant les nombres de fils de caret que contiennent les deux cordes, ce qui donne

$$R' = R\frac{D}{D'} \times \frac{n'}{n}.$$

Pour les cordes blanches mouillées, Navier admet que la roideur constante ad^{μ} est double de celle des mêmes cordes sèches, mais que la roideur variable bd^{μ} est la même que pour ces dernières. Les expériences ne paraissent pas assez nombreuses pour conclure rien de général à cet égard.

Tableau de la roideur de différentes cordes s'enroulant sur une poulie de 1 mètre de diamètre, calculée par Navier, d'après les expériences de Coulomb.

INDICATION des cordes.	NOMBRES de fils de caret.	DIAMÈTRES des cordes.	POIDS des cordes par mètre de longueur.	ROIDEUR constante ad^{μ}.	ROIDEUR variable bd^{μ}, par kilogr. de la charge Q.
		m.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
Corde blanche neuve.	30	0.0200	0.2834	0.22240	0.0097382
id.	15	0.0144	0.1448	0.063514	0.0055182
id.	0	0.0088	0.0522	0.0100038	0.0023804
Corde goudronnée. .	30	0.0230	0.3326	0.3490	0.0125514
id.	15	0 0108	0,1632	0.105928	0.0000592
id.	6	0.0096	0.0093	0.021208	0.0025902

Ce tableau montre bien, comme nous l'avons fait remarquer, que les quantités ad^{μ} et bd^{μ} ne varient pas avec la grosseur de la corde suivant une même loi (ad^{μ} croît à peu près proportionnellement à la quatrième puissance du diamètre, et bd^{μ} à la deuxième puissance).

Il est donc impossible que l'expression (a) représente la résistance R; d'abord parce que les deux termes ad^{μ} et bd^{μ} ne varient pas proportionnellement à la même puissance du diamètre d; mais aussi parce qu'il arriverait qu'ayant $d=1^{m},00$, une corde usée donnerait la même résistance qu'une corde neuve, ce qui est inadmissible.

Application. A l'aide de ce tableau, et en admettant les formules précédentes, on peut résoudre tous les problèmes analogues au suivant :

Quelle est la résistance due à la roideur d'une corde blanche neuve de 0m,0254 de diamètre, s'enroulant sur une poulie de 0m,40 de diamètre et élevant un poids de 500 kilog.?

La corde blanche neuve du tableau, dont le diamètre $0^{m},02$ s'approche le plus de $0^{m},0254$, donne, en remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (a),

$$R=\frac{1}{0,40}(0,22246+0,0097382\times 500)=12^{k},73.$$

Alors, pour la corde de $0^{m},0254$ de diamètre placée dans les mêmes circonstances, on aura [formule (b)]

$$R'=12,73\left(\frac{0,0254}{0,02}\right)^{2}=20^{k},53.$$

66. M. Morin, reprenant la discussion des résultats de Coulomb, a conclu, en appelant A et B les deux quantités que Navier a représentées par ad^{μ} et bd^{μ} :

1° Que pour les cordes en chanvre non goudronnées, dites *cordes*

blanches, sèches ou imbibées d'eau, en bon état, A et B varient à peu près proportionnellement au carré du diamètre de la corde ;

2° Que pour ces mêmes cordes à demi usées, A et B varient comme les puissances 1,5, c'est-à-dire comme les racines carrées des cubes des diamètres des cordes (*Int.*, 428 et suivants) ;

3° Que pour les cordes goudronnées, B est proportionnel au nombre de fils de caret de la corde.

De cette discussion, M. Morin a conclu les formules suivantes, dans lesquelles n désigne le nombre des fils de caret et D le diamètre de la poulie :

1° Cordes blanches

$$A=(0{,}000297+0{,}000245\,n)\,n \quad \text{et} \quad B=0{,}000363\,n,$$

d'où $$R=\frac{1}{D}\left[(0{,}000297+0{,}000245\,n)\,n+0{,}000363\,n\,Q\right] \text{ kil.}$$

2° Cordes goudronnées

$$A=(0{,}0014575+0{,}000346\,n)\,n \quad \text{et} \quad B=0{,}0004181\,n,$$

d'où $$R=\frac{1}{D}\left[(0{,}0014575+0{,}000346\,n)\,n+0{,}0004181\,n\,Q\right] \text{ kil.}$$

M. Morin, en faisant usage de ces formules, a calculé les résultats du tableau suivant pour une poulie de 1 mètre de diamètre.

NOMBRE DE FILS.	CORDES BLANCHES.			CORDES GOUDRONNÉES.		
	Diametre.	Roideur constante A.	Roideur variable B, par kilogramme de la charge Q.	Diamètre.	Roideur constante A.	Roideur variable B, par kilogramme de la charge Q.
	mètres.	kilogr.	kilogr.	metres.	kilogr.	kilogr.
6	0.0089	0.0106038	0.002178	0.0105	0.021201	0.002512992
9	0.0110	0.0225207	0.003267	0.0129	0.041143	0.003769488
12	0.0127	0.0388476	0.004356	0.0149	0.067314	0.005025984
15	0.0141	0.0595845	0.005445	0.0167	0.097712	0.006282480
18	0.0155	0.0847314	0.006534	0.0183	0.138339	0.007538976
21	0.0168	0.1142883	0.007623	0.0198	0.183193	0.008795472
24	0.0179	0.1482552	0.008712	0.0211	0.234276	0.010051968
27	0.0190	0.1866321	0.009801	0.0224	0.291586	0.011308464
30	0 0200	0.2294190	0.010890	0.0236	0.355125	0.012564963
33	0.0210	0.2766159	0.011979	0.0247	0.424891	0.013821456
36	0.0220	0.3282228	0.013068	0.0258	0.500886	0 015077952
39	0.0228	0.3842397	0.014157	0.0268	0.583108	0.016334448
42	0.0237	0.4446666	0.015246	0.0279	0.671558	0.017590944
45	0.0246	0.5095035	0.016335	0.0289	0.766237	0.018847440
48	0.0254	0.5787504	0.017424	0.0298	0.867144	0.020103936
51	0.0261	0.6524073	0.018513	0.0308	0.974278	0.021360432
54	0.0268	0.7304742	0.019602	0.0316	1.087641	0.022616928
57	0.0276	0.8129511	0.020091	0.0326	1.207231	0.023873424
60	0 0283	0.8998380	0.021780	0.0334	1.333050	0.025129920

Application. Soit à résoudre le même problème qu'au n° 65. Substituant les valeurs de A et B correspondant au diamètre $0^m,0254$ dans la formule

$$R = \frac{1}{D}(A + BQ),$$

on a, en remarquant que $n = 48$,

$$R = \frac{1}{0,40}(0,5787504 + 0,017424 \times 500) = 23^k,23$$

au lieu de $20^k,53$ que nous avons trouvés en faisant usage de la table de Navier.

Pour un tour de poulie, le travail absorbé par cette résistance est

$$\mathcal{T}_n = \pi D \times 23^k,23 = 3,14 \times 0,40 \times 23,23 = 29^{km},18.$$

La puissance

$$P = Q + R\frac{D}{D+d} = 500 + 23,23\frac{0,40}{0,40 + 0,0254} = 521^k,84.$$

Le travail utile est, pour un tour de poulie,

$$\mathcal{T}_u = \pi(D + d) \times Q = 1,336 \times 500 = 668\ ^{km},$$

et le travail moteur,

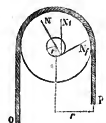
$$\mathcal{T}_m = P\pi(D + d) = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n = 668 + 29,18 = 697^{km},18.$$

En pratique il convient, quand cela est possible, de remplacer les cordes rondes par des cordes plates, qui ont plus de flexibilité et plus de durée.

On diminue beaucoup la roideur des cordes en les imprégnant d'un corps gras ou en les frottant avec du savon.

67. *Équilibre dynamique de la poulie (Int., 1253).*

Fig. 1.



Négligeant le poids de la poulie, le système est soumis à l'action de cinq forces :

- P puissance ;
- Q résistance ;
- N réaction normale du support sur les tourillons ou l'œil de la poulie ;
- Nf frottement des tourillons (59). Ordinairement les surfaces frottantes n'étant qu'un peu onctueuses, il convient de faire $f = 0,15$;
- $\frac{1}{D}(A + BQ)$ roideur de la corde (65 et 66).

Pour un tour de poulie, l'équilibre dynamique donne, en remarquant que le travail de la réaction normale est nul;

$$P2\pi r = Q2\pi r + Nf2\pi r' + \frac{\pi D}{D}(A + BQ).$$

Remarquant que la résultante N_1 des réactions N et Nf est égale et directement opposée à la résultante de P et Q, cela permet d'éliminer N dans l'équation précédente, qui donne alors

$$P = Q + \frac{1}{2r}(A + BQ) + f_1\frac{r'}{r}\sqrt{P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\omega}\,;$$

$$f_1 = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}$$

ω angle que font entre eux les deux brins de la corde ou les deux forces P et Q.

Quand les deux forces P et Q sont parallèles, on a $\omega = 0$, $\cos\omega = 1$, et la formule précédente devient

$$P = \frac{1}{r - f_1 r'}\left[\frac{1}{2}A + \left(r + \frac{1}{2}B + f_1 r'\right)Q\right]. \qquad (a)$$

Pour les données du n° 66, c'est-à-dire pour $Q = 500$ kil., un diamètre de poulie $D = 0^m,40$ et un diamètre de corde $d = 0^m,0254$, d'où $r = 0^m,2127$, supposant $r' = 0^m,01$, on a d'abord

$$f_1 = \frac{0,15}{\sqrt{1 + 0,15 \times 0,15}} = 0,1484.$$

et par suite,

$$P = \frac{1}{0,2127 - 0,1484 \times 0,01}\left[\frac{0,5787504}{2} + (0,2127 + \frac{0.017424}{2} + 0,1484 \times 0,01)\,500\right] = 529^k.$$

Remarque. La formule (a) fait voir que la valeur de P se compose de deux parties : la première $\frac{A}{2(r - f_1 r')}$, qui est constante pour une même poulie et une même corde, et que l'on peut représenter par α; la deuxième $\frac{(r + \frac{1}{2}B + f_1 r')Q}{r - f_1 r'}$, qui est proportionnelle à Q et que l'on peut représenter par βQ; ce qui permet de mettre la valeur de P sous la forme

$$P = \alpha + \beta Q.$$

68. *Équilibre dynamique de la moufle ou du palan, en négligeant le poids de la corde et des poulies, le frottement latéral des poulies, et en supposant que les poulies ont même diamètre et que les cordes sont parallèles* (*Int.*, 1254).

Fig. 2.



Appelant :

P la puissance ou tension du cordon libre ou *garant;*
Q la résistance utile;
t_1, t_2, t_3 . . . . t_n, les tensions des divers cordons allant d'une chape à l'autre;
n le nombre des cordons allant d'une chape à l'autre;
α et β les fonctions déterminées comme à la remarque précédente.

On a (67)

$$t_2 = \alpha + \beta t_1$$
$$t_3 = \alpha + \beta t_2$$
$$\cdots\cdots\cdots$$

D'où il résulte qu'assignant une valeur arbitraire à t_1, on peut déterminer les valeurs correspondantes de $t_2, t_3 \ldots.\ t_n$ et P; mais remarquan que l'on a $Q = t_1 + t_2 + \ldots.\ t_n$, de ces diverses formules on conclut la suivante, qui donne directement la valeur de P en fonction de Q,

$$P = \alpha\left(\frac{n\beta^n}{\beta^n - 1} - \frac{1}{\beta - 1}\right) + \frac{(\beta - 1)\beta^n}{\beta^n - 1}Q.$$

En négligeant toutes les résistances passives, on aurait

$$t_1 = t_2 = \ldots. = t_n = P, \text{ et } Q = t_1 + t_2 + \ldots. + t_n = nP.$$

Ainsi la tension de chacun des cordons serait égale à la puissance P, et la résistance Q serait égale à la puissance P multipliée par le nombre n des cordons allant d'une chape à l'autre.

La vitesse de Q est à celle de P dans le rapport $\frac{P}{Q} = \frac{P}{nP} = \frac{1}{n}$, c'est-à-dire que la vitesse de Q est égale à celle de P divisée par le nombre des cordons allant d'une chape à l'autre. Il est évident que, sauf l'allongement inégal des cordons sous des charges différentes, le rapport des vitesses de Q et de P est le même, que l'on tienne ou non compte des résistances passives.

Application. Quelle doit être la valeur de P pour soulever un poids de 300 kil., $D = 0^m,10$ étant le diamètre des poulies et $r' = 0^m,005$ le rayon de l'œil, le nombre des brins allant d'une chape à l'autre étant 6, comme dans la figure, et le diamètre d de ces brins, $0^m,011$?

On a d'abord, remarquant que $f_1 = 0,1484$ (67),

$$\alpha = \frac{0,0225207}{2\,(0,0555 - 0,1484 + 0,005)} = 0,20564,$$

$$\beta = \frac{\left(0,0555 + \frac{0,003267}{2} + 0,1484 \times 0,005\right)}{0,0555 - 0,1484 \times 0,005} = 1,0569.$$

Afin d'abréger les calculs, il convient de faire usage des logarithmes pour calculer β^6; on pose $log\,(\beta^6) = 6\,log\,\beta$, d'où on conclut $\beta^6 = 1,3747$.

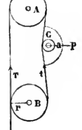
On a ensuite

$$P = 0,20564\left(\frac{6 \times 1,3747}{1,3747 - 1} - \frac{1}{1,0569 - 1}\right) + \frac{(1,0569 - 1)\,1,3747}{1,3747 - 1} \times 500 =$$
$$= 0,9127 + 0,20875 \times 500 = 105^k,29.$$

Au lieu de $P = \frac{500}{6} = 83^k,33$, qu'on aurait eu si les résistances passives eussent été nulles.

69. *Frottement d'une corde ou d'une courroie sur un cylindre fixe.* La force T (*fig.* 3), capable de faire glisser une corde ou une courroie sur un cylindre fixe B, en la tirant par une de ses extrémités, cette corde ou cette courroie étant sollicitée à son autre extrémité par une force t, est donnée par la formule

Fig. 3.



$$T = t\,(e)^{\frac{fs}{r}},\ \text{d'où } (Int.,\ 340)\ log\,T = log\,t + (\log e)\,\frac{fs}{r}.$$

T force qui produit le mouvement;
t force qui s'oppose au mouvement;
$e = 2,71828$ base des logarithmes népériens;
$Log\,e = 0,434$;
f coefficient de frottement;
s longueur, en mètres, de l'arc embrassé par la corde ou la courroie sur le rouleau;
r rayon du rouleau.

D'après les expériences de M. Morin, les valeurs de f sont :

0,47 pour des courroies à l'état ordinaire d'onctuosité sur des tambours en bois;
0,50 *id.* neuves *id.*
0,28 *id.* à l'état ordinaire d'onctuosité sur des poulies en fonte;
0,38 *id.* humides *id.*
0,50 pour des cordes de chanvre sur des poulies ou tambours en bois.

La formule fait voir que, pour une même valeur de t, T ne dépend pas seulement de s, mais bien de $\frac{s}{r}$, c'est-à-dire du nombre de degrés de

l'arc embrassé ; ainsi il est inutile d'augmenter démesurément le diamètre des tambours dans l'unique but d'empêcher le glissement des courroies (tableau n° 70).

70. *Transmission de mouvement au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin.* Quand, au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin, on transmet le mouvement d'une poulie A (*fig.* 3) à une autre poulie B, à l'extrémité du rayon de laquelle agit une résistance Q, qui s'oppose au mouvement, on a ; en appelant T la tension du brin conducteur, t celle du brin conduit, et T' la tension commune des deux brins en repos,

$$T' = \frac{T+t}{2}, \qquad (a)$$

et

$$T - t = Q. \qquad (b)$$

Pour que la courroie ne glisse pas sur la poulie B, il faut que son frottement sur cette poulie soit au moins égal à Q.

Ayant (69)

$$T = t\,(e)^{\frac{f s}{r}}, \qquad (c)$$

des équations (*b*) et (*c*) on conclut

$$t = \frac{Q}{(e)^{\frac{f s}{r}} - 1}. \qquad (d)$$

L'équation (*d*) donne la valeur de t, qu'en pratique on augmente de 1/10, afin de s'assurer que la courroie ne glissera pas. Cette valeur, substituée dans l'équation (*b*), fournit T, et les valeurs de T et t, substituées dans l'équation (*a*), donnent T'.

Application. Supposons que la demi-circonférence de la poulie en fonte B (*fig.* 3) soit embrassée par une courroie de transmission qui donne $f = 0{,}28$ (69), et que l'on ait $r = 0^m{,}30$ et $Q = 30$ kilog., la formule (*d*) donne

$$t = \frac{Q}{(e)^{\frac{f s}{r}} - 1} = \frac{30}{(2{,}71828)^{\frac{0{,}28 \times 3{,}14 \times 0{,}30}{0{,}30}} - 1}$$

d'où (*Int.*, 340)

$$t = \frac{30}{2{,}41 - 1} = 35^k{,}46.$$

Augmentant cette valeur de 1/10 pour s'assurer que la courroie ne glissera pas, on a $t = 39$ kilog.

La formule (*b*) donne alors

$$T = t + Q = 39 + 50 = 89 \text{ kilog.},$$

et la formule (a),

$$T = \frac{T+t}{2} = \frac{89+39}{2} = 64\,\text{kilog.}$$

Il est évident que ce calcul doit être fait pour la poulie qui donne la plus grande valeur de t ; ainsi les deux poulies étant de même matière, on devra calculer t pour celle qui est la plus petite, c'est-à-dire pour celle dont la portion de circonférence embrassée est la plus petite.

Le tableau suivant, que nous extrayons de l'*Aide-mémoire* de M. Morin, donne les valeurs de $(e)^{\frac{fs}{r}}$ pour différents rapports de l'arc embrassé à la circonférence entière ; ce qui abrégera considérablement, pour ces rapports, le calcul de t, ainsi que celui de T, dans les applications relatives au n° 69.

RAPPORT de l'arc embrassé à la circonférence entière.	Valeurs de $(e)^{\frac{fs}{r}}$ pour des					
	courroies neuves sur des tambours en bois.	courroies à l'état ordinaire		courroies humides sur des poulies en fonte.	cordes sur des tambours ou des treuils en bois	
		sur des tambours en bois.	sur des poulies en fonte.		brut.	poli.
0.2	1.87	1.80	1.42	1.61	1.87	1.51
0.3	2.57	2.43	1.69	2.05	2.57	1.86
0.4	3.51	3.26	2.02	2.60	3.51	2.29
0.5	4.81	4.38	2.41	3.30	4.81	2.82
0.6	6.59	5.88	2,87	4.19	6.58	3 47
0.7	9.00	7 90	3.43	6.32	9.01	4.27
0.8	12 34	10.62	4.09	6.75	12.34	5.25
0.9	16.90	14.27	4.87	8.57	16.90	6.46
1.0	23.14	19.16	5.81	10.89	23.90	7.95
1.6	»	»	»	»	111.31	22.42
2.0	»	»	»	»	535.47	63,23
2.5	»	»	»	»	2575.80	178.52

71. *Rouleaux de tension.* Pour maintenir constante la tension des cordes ou des courroies sans fin, malgré leur allongement, on fait usage d'un rouleau de tension C (*fig.* 3), dont la pression sur la courroie est donnée par la formule

$$p = 2t' \cos\frac{1}{2}a,$$

p pression du rouleau sur la corde ou courroie, suivant la bissectrice de l'angle a, que font entre elles les deux parties du brin sur lequel il agit;

t' tension des deux parties du brin sur lequel agit le rouleau ; dans le cas de la figure 3, on a $t' = t$.

L'angle a, qui est toujours très-obtus, se mesure sur la courroie mise en place.

Supposant l'angle $a = 170°$ ou $\frac{1}{2}a = 85°$ dans l'exemple du n° 70, on a, en remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule précédente (*Int.*, 856),

$$p = 2 \times 39 \times 0{,}08716 = 6^{k},80.$$

Remarque. Afin que les courroies ne quittent pas les poulies sur lesquelles elles passent, il convient que les pourtours de ces poulies aient une convexité égale au 1/10 de leur largeur.

72. *Largeur des courroies.* On peut, sans craindre un allongement trop rapide des courroies de transmission de mouvement, leur faire subir un effort de 1/4 de kilogramme par millimètre carré de section ; ce qui permettra de calculer leur largeur, connaissant l'épaisseur du cuir à employer.

Au moulin de M. Darblai, à Corbeil, le mouvement est communiqué à chaque meule à l'aide d'une courroie qui passe sur deux poulies de même diamètre, dont l'une est montée sur l'arbre de la meule. Dans les moulins à l'anglaise, les meules ont $1^{m},30$ de diamètre et leur vitesse de régime est de 120 révolutions par minute. Chez M. Darblai, les poulies motrices ont $1^{m},30$ de diamètre comme les meules, et une largeur de $0^{m},12$; elles sont tournées avec beaucoup de soin et légèrement bombées sur le pourtour, afin que la courroie ne glisse pas. Les courroies enveloppent ces poulies sur la moitié de leur circonférence; elles ont de $0^{m},10$ à $0^{m},11$ de largeur; elles sont en cuir de bonne qualité, bien corroyé; leur longueur est telle qu'elles deviennent complétement lâches quand on soulève le rouleau de tension, ce qui fournit un moyen facile de débrayer et d'embrayer. Avec une telle vitesse de poulies, $3{,}14 \times 1{,}30 \times 2 = 8^{m},16$ par seconde, les courroies n'ont pas besoin d'être fortement tendues; aussi, quoique le travail à transmettre peut s'élever quelquefois à plus de trois chevaux, le contre-poids adapté au levier des tendeurs est-il extrêmement faible.

Dans un travail présenté par M. Laborde à la Société industrielle de Mulhouse, cet ingénieur, avant de poser le principe sur lequel il base le calcul des largeurs à donner aux courroies, fait les observations suivantes :

1° La résistance à vaincre doit être moindre que la force qui ferait glisser la courroie sur la poulie;

2° La tension ne doit pas aller au point d'étendre le cuir;

3° La tension ne doit pas non plus augmenter inutilement le frottement sur les pivots ou les coussinets;

4° Une courroie doit être flexible, c'est-à-dire qu'elle doit se ployer facilement dans toutes ses parties.

Les trois premières conditions sont évidentes; quant à la quatrième, on en conclut qu'une courroie ne doit jamais être doublée, mais bien se composer seulement d'une seule épaisseur de cuir. L'auteur conseille, pour empêcher les courroies de se dessécher, de les graisser de temps à autre avec du suif pur ou mêlé de saindoux, ce qui se fait très-bien pendant la marche; cela les rend flexibles et en augmente la durée. L'expérience a montré que les poulies à surface lisse étaient préférables à celles qui seraient rayées dans un sens ou dans un autre, parce que les premières offrent un plus graud nombre de points de contact.

Après ces considérations, M. Laborde pose les principes suivants :

1° Les largeurs des courroies doivent être en raison directe des puissances à transmettre, la vitesse restant la même;

2° Les largeurs des courroies sont en raison inverse des vitesses avec lesquelles elles se meuvent, pour un même travail transmis.

D'où on conclut, l, l' étant les largeurs de deux courroies, f, f' les puissances transmises, et v, v' les vitesses,

$$l : l' :: \frac{f}{v} : \frac{f'}{v'}, \text{ d'où } l' = l\frac{f'v}{fv'}.$$

M. Laborde a reconnu par expérience qu'une courroie de 0m,081 de largeur, marchant avec une vitesse de 162m,50 par minute, peut très-bien, avec une tension ordinaire, et sans se déformer, transmettre une force de 1 cheval-vapeur; cette courroie agissant sur des poulies non rayées, mais tournées lisses et d'égal diamètre, c'est-à-dire embrassées sur la moitié de leur circonférence. Partant de cette donnée, à l'aide de la formule précédente on peut déterminer la largeur à donner à une courroie marchant dans des conditions déterminées; ainsi pour transmettre une puissance de 2 chevaux avec une vitesse de courroie de 112m,50, on devra prendre

$$l' = 0{,}081\,\frac{2 \times 162{,}50}{1 \times 112{,}50} = 0^{m}{,}234.$$

C'est en opérant ainsi que la table suivante a été calculée.

Vitesse par minute en mètres.	Largeur des courroies en millimètres, pour des forces de 1/10 à 9/10 de cheval								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
20	68	132	196	264	328	396	»	»	»
25	52	106	158	208	264	316	370	422	»
30	44	88	132	174	220	264	308	348	394
35	38	70	114	150	188	226	264	302	346
40	34	60	98	132	164	198	236	264	296
45	30	58	88	118	140	176	206	234	264
50	26	53	79	106	132	158	185	211	237
60	22	44	66	87	110	132	154	174	197
70	19	38	57	75	94	113	132	151	170
80	17	33	49	66	82	99	115	132	148
90	15	29	44	59	73	88	103	117	132
100	13	26	40	53	66	79	92	106	119
110	12	24	36	48	60	72	84	96	108
120	11	22	33	44	55	66	77	88	99
130	10	20	36	41	51	61	71	81	91
140	9	19	28	38	47	57	66	75	85
150	9	18	26	35	44	53	62	70	79
160	8	17	25	33	41	49	58	66	74
170	8	16	23	31	39	47	54	62	70
180	»	15	22	29	37	45	51	59	66
190	»	14	21	28	35	42	49	56	60
200	»	13	20	26	33	40	46	53	55
220	»	12	18	24	30	36	42	48	51
240	»	11	17	22	28	33	39	44	47
260	»	10	15	20	26	30	35	41	44
280	»	9	14	19	24	28	33	38	41
300	»	9	13	18	22	26	31	35	39
320	»	8	12	16	21	25	29	33	37
340	»	8	12	16	19	23	27	31	35
360	»	»	11	15	18	22	26	29	33
380	»	»	10	14	17	21	24	28	30
400	»	»	10	13	16	20	23	26	28
440	»	»	9	12	15	18	21	24	26
480	»	»	9	11	14	17	19	22	25
500	»	»	»	11	13	16	18	21	24

Vitesse par minute en mètres.	Largeur des courroies en millimètres, pour des forces en chevaux de									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	220	440	»	»	»	»	»	»	»	»
70	188	377	565	»	»	»	»	»	»	»
80	165	329	494	»	»	»	»	»	»	»
90	147	293	440	580	»	»	»	»	»	»
100	132	264	396	528	»	»	»	»	»	»
110	120	240	360	480	600	»	»	»	»	»
120	110	220	330	440	550	»	»	»	»	»
130	101	203	304	406	507	608	»	»	»	»
140	94	188	283	377	471	565	»	»	»	»
150	88	176	264	352	440	527	615	»	»	»
160	82	165	247	329	412	494	570	»	»	»
170	78	155	233	310	388	466	543	621	»	»
180	73	147	220	293	367	440	513	586	»	»
190	69	139	208	278	347	416	486	555	»	»
200	66	132	198	264	330	396	462	528	594	»
220	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
240	55	110	165	220	275	330	385	440	495	550
260	51	101	152	203	254	304	355	406	457	507
280	47	94	141	188	236	283	330	377	424	471
300	44	88	132	176	220	264	308	352	396	440
320	41	82	124	165	206	247	288	330	371	412
340	39	80	116	155	194	233	272	310	349	388
360	37	73	110	146	183	220	256	293	329	366
380	35	69	104	139	174	208	243	278	313	347
400	33	66	99	132	165	198	231	264	297	330
440	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
480	28	55	83	110	138	165	193	220	248	275
500	26	53	79	100	132	158	185	211	238	264
520	25	51	76	102	127	152	178	203	229	254
560	24	47	71	94	118	142	165	189	212	236
600	22	44	66	88	110	132	154	176	198	220
650	20	41	61	81	102	122	142	162	183	203
700	»	38	56	75	94	113	132	150	169	188
800	»	33	50	66	83	99	116	132	149	165
900	»	29	44	59	74	88	103	118	133	147
1000	»	26	40	53	66	79	92	106	119	132

Toutes choses égales d'ailleurs, il est évident que les largeurs du tableau précédent doivent être modifiées quand la courroie n'enveloppe pas la moitié de la poulie, puisqu'alors le frottement Q restant le même, la tension de la courroie doit varier.

Ayant déterminé les rapports de Q à t pour différents arcs embrassés, rapports consignés dans la deuxième colonne du tableau suivant, et que l'on calcule à l'aide de la formule (70)

$$t = \frac{Q}{e^{\frac{fs}{r}} - 1}, \quad \text{d'où} \quad \frac{Q}{t} = e^{\frac{fs}{r}} - 1,$$

comme la largeur de la courroie varie proportionnellement à T, ou à t qui lui est proportionnel, elle varie donc en sens inverse de la valeur du rapport $\frac{Q}{t}$. Ainsi, connaissant la largeur l qu'il convient de donner à une courroie qui enveloppe par exemple la moitié d'une poulie, pour avoir la largeur l' qu'il convient de donner à une courroie qui n'envelopperait pas la moitié d'une poulie de même nature, ayant même vitesse à la circonférence, et transmettant la même puissance, c'est-à-dire donnant le même frottement Q, on posera

$$l' : l :: e^{\frac{fs}{r}} - 1 : e^{\frac{fs'}{r}} - 1, \text{ d'où } l' = l\,\frac{e^{\frac{fs}{r}} - 1}{e^{\frac{fs'}{r}} - 1}.$$

Formule qui donnera l', après avoir calculé séparément $e^{\frac{fs}{r}} - 1 = 1{,}41$ qui se rapporte à l, et $e^{\frac{fs'}{r}} - 1$ qui se rapporte à l'.

Le tableau suivant donne, pour des poulies en fonte, les résultats de ces calculs pour les arcs embrassés consignés dans la première colonne.

RAPPORT de l'arc embrassé à la circonférence entière.	VALEUR DE $e^{\frac{fs'}{r}} - 1$	VALEUR DE $\frac{1.41}{e^{\frac{fs'}{r}} - 1}$
0.2	0.42	3.36
0.3	0.69	2.04
0.4	1.02	1.38
0 5	1.41	1.00
0.6	1.87	0.75
0.7	2.43	0.58
0.8	3.09	0.46
0.9	3.87	0.36
1.0	4.81	0.29

1re *Application.* Quelle est la largeur à donner à une courroie qui doit transmettre une puissance de 0,6 de cheval, la vitesse de la courroie étant de 80 mètres par minute, et la poulie étant enveloppée sur les 0,6 de sa circonférence?

Le tableau page 53 donnant $l = 0^m,099$ lorsque la poulie est enveloppée sur la moitié de la circonférence, cherchant dans la troisième colonne du tableau précédent le nombre qui correspond à l'arc 0,6, il en résulte que la largeur à donner à la courroie est

$$l' = 0^m,099 \times 0,75 = 0^m,075.$$

2e *Application.* Pour une puissance de quatre chevaux, une vitesse

de courroie de 400 mèt., et un arc embrassé sur la petite poulie de 0,4, le tableau page 53 donne $l = 0^m,132$, et par suite on a

$$l' = 0,132 \times 1,38 = 0^m,182.$$

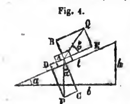
Tout ce qui précède suppose le cuir de bonne qualité, et d'une épaisseur ordinaire et uniforme; mais il est évident que lorsqu'il s'agira de transmettre de faibles puissances avec de grandes vitesses, il conviendra de réduire l'épaisseur des courroies et d'augmenter leur largeur, afin d'obtenir la même résistance et plus de flexibilité; alors on déterminera les dimensions de la section de la courroie d'après la règle donnée au commencement de ce numéro.

Des considérations semblables à celles qui viennent d'être exposées sur la largeur des courroies qui n'enveloppent pas la moitié de la circonférence avaient déjà été données par M. Paul Heilmann (*Bulletin* n° 40, année 1835, de la Société industrielle de Mulhouse).

MACHINES SIMPLES.

73. *Plan incliné* (*Int.*, 1255).

Fig. 1.



Le corps glissant par son propre poids, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir

$$P \sin\alpha = fP \cos\alpha, \text{ d'où } f = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \tan\alpha.$$

P poids du mobile;
α angle que fait le plan incliné avec l'horizon;
f coefficient de frottement (59).

Ainsi il y aura équilibre dynamique lorsque la tangente de l'inclinaison du plan à l'horizon sera égale au coefficient de frottement f.

De là résulte un moyen de déterminer le coefficient de frottement de deux corps. On forme le plan incliné avec l'un des corps, et le mobile avec l'autre; puis on incline doucement le plan incliné jusqu'à ce que le mobile soit prêt à se mettre en mouvement, c'est-à-dire jusqu'au point où le mobile conserve le léger mouvement qu'on lui imprime. A ce point, le mobile est en équilibre dynamique, et la tangente de l'angle α que fait le plan avec l'horizon est égale au coefficient de frottement f.

Ayant trouvé $\alpha = 12° 25'$, on a (*Int.*, 856), $\tan\alpha = f = 0,22$, valeur qui a été trouvée pour le bronze glissant sur la fonte sans enduit (60).

Pour $f = 0,08$, on a $\tan\alpha = 0,08$, et par suite, $\alpha = 4° 35'$.

Si le mobile est sollicité, non-seulement par son poids, mais aussi par une ou plusieurs autres forces dont la résultante Q *agit dans le plan vertical* PAE *passant par le centre de gravité du corps et la ligne*

de plus grande pente du plan incliné, pour qu'il y ait équilibre dynamique on doit avoir

$$P \sin\alpha = Q\cos\beta + f(P\cos\alpha - Q\sin\beta), \quad \text{d'où } Q = P\frac{\sin\alpha - f\cos\alpha}{\cos\beta - f\sin\beta}. \quad (1)$$

β angle que fait la force Q avec la partie AE de la ligne de plus grande pente. Il faut donner à $\cos\beta$ un signe négatif quand l'angle β est plus grand qu'un droit. (*Int.*, 819.)

Si le mobile montait le plan incliné au lieu de le descendre, on aurait, pour l'équilibre dynamique,

$$Q\cos\beta = P\sin\alpha + f(P\cos\alpha - Q\sin\beta), \quad \text{d'où } Q = P\frac{\sin\alpha + f\cos\alpha}{\cos\beta + f\sin\beta}.$$

Si la force Q, au lieu d'agir de manière à tendre à soulever le mobile de dessus le plan incliné, comme nous l'avons supposé dans les deux formules précédentes et dans la figure, *agissait en dessous de* DE *de manière à presser le mobile sur le plan*, il suffirait simplement de remplacer le signe — de $Q\sin\beta$ par le signe + dans les deux formules précédentes.

Dans le cas où l'angle α *est nul, c'est-à-dire quand le plan est horizontal*, on a $\sin\alpha = 0$ et $\cos\alpha = 1$, $Q\cos\beta$ est seul puissance, et l'équation d'équilibre dynamique est

$$Q\cos\beta = f(P \pm Q\sin\beta), \quad \text{d'où } Q = P\frac{f}{\cos\beta \pm f\sin\beta}.$$

Si l'angle β *était nul, c'est-à-dire si* Q *agissait parallèlement au plan incliné*, on aurait $\sin\beta = 0$, $\cos\beta = \pm 1$, et l'équation (1) deviendrait

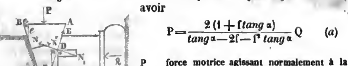
$$P\sin\alpha = \pm Q + fP\cos\alpha.$$

Enfin, si à la fois les angles α *et* β *étaient nuls*, on aurait, pour l'équilibre dynamique :

$$Q = fP. \quad (59)$$

74. ***Équilibre dynamique de la presse à coin*** (*Int.*, 1257).

Fig. 5.



Pour l'équilibre dynamique, on doit avoir

$$P = \frac{2(1 + f\tang\alpha)}{\tang\alpha - 2f - f^2\tang\alpha}Q \quad (a)$$

P force motrice agissant normalement à la tête du coin ;

Q résistance utile qu'oppose la matière à comprimer ;

α angle que fait la tête du coin avec chacune des faces travaillantes ;

f coefficient de frottement (59), que l'on suppose être le même pour les deux faces travaillantes du coin et pour le bloc interposé entre le coin et la matière sur son support.

Pour Q = 1000 kil., $\alpha = 87^\circ 10'$, d'où (*Int.*, 856) $tang\,\alpha = 20,205333$, ou sensiblement 20,2, et $f = 0,16$, qui convient au chêne frotté de savon sec, glissant sur chêne, les fibres étant parallèles (60), l'équation précédente donne

$$P = \frac{2(1+0,16\times 20,2)}{20,2-2\times 0,16-0,16\times 0,16\times 20,2}\times 1000 = 0,437\times 1000 = 437^k.$$

Telle est la relation qui doit exister entre la puissance P et la résistance utile Q, pour qu'il y ait équilibre dynamique, c'est-à-dire pour que le moindre effort mette la presse en mouvement, et que ce mouvement se conserve uniforme quand cet effort additionnel cesse son action. Il est évident qu'un tel mouvement ne peut se réaliser qu'autant que Q reste constant, ce qui n'a pas lieu quand on comprime des matières; mais dans toutes les positions les valeurs de P et Q sont liées par la relation précédente.

L'application qui vient d'être faite montre que cette presse est peu avantageuse pour obtenir de grandes compressions, et qu'il ne convient guère de l'employer quand la force motrice n'est qu'une simple pression et non le résultat d'un choc.

75. *Relation entre le travail moteur et le travail utile résistant.*

Pour un abaissement e du coin, le bloc comprimant avançant de $2e'$, les travaux moteur et utile sont

$$P\times e \quad \text{et} \quad Q\times 2e'.$$

On a (*Int.*, 845)

$$e = e'\,tang\,\alpha. \qquad (b)$$

Multipliant membre à membre les équations (*a*) et (*b*), on obtient

$$Pe = \frac{tang\,\alpha + f\,tang^2\alpha}{tang\,\alpha - 2f - f^2\,tang\,\alpha}\,Q\times 2e'. \qquad (c)$$

Formule donnant le travail moteur Pe en fonction du travail utile $Q\times 2e'$.

76. *Équilibre dynamique de la presse à vis à filets carrés* (*Int.*, 1262).

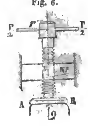


Fig. 6.

Appelant :

P la puissance agissant dans un plan perpendiculaire à l'axe. La force P est supposée répartie uniformément autour de l'axe de la vis, afin qu'elle ne fasse naître aucune pression contre la surface latérale des filets; ainsi elle est composée, par exemple, de deux forces $\frac{1}{2}P$ formant un couple dont le bras de levier est divisé en deux parties égales par l'axe;

r le bras de levier de la puissance P;

r' le rayon moyen de la surface hélicoïdale en contact;

- r'' le rayon de la surface par laquelle le bout de la vis frotte sur AB;
- α l'angle que fait l'hélice moyenne, ou mieux la tangente à cette hélice, avec le plan perpendiculaire à l'axe;
- h le pas de l'hélice (*Int.*, 976); c'est l'espace parcouru suivant l'axe de la vis pour une révolution de cette vis, ou encore la distance d'axe en axe de deux filets consécutifs;
- f le coefficient de frottement, que l'on suppose être le même pour les filets et le bout de la vis;
- Q la résistance utile que la matière oppose au mouvement de translation de la vis; elle agit suivant l'axe de la vis,

on a, pour l'équilibre dynamique,

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{tang\,\alpha + f}{1 - f\,tang\,\alpha} + \frac{2}{3}\frac{r''}{r}f\right),$$

ou, en remplaçant $tang\,\alpha$ par son égal $\frac{h}{2\pi r'}$,

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{h + 2\pi r' f}{2\pi r' - fh} + \frac{2}{3}\frac{r''}{r}f\right). \qquad (a)$$

Dans le cas où on néglige le frottement du bout de la vis sur la surface AB, ces formules deviennent respectivement

$$P = Q\frac{r'}{r} \times \frac{tang\,\alpha + f}{1 - f\,tang\,\alpha},$$

et

$$P = Q\frac{r'}{r} \times \frac{h + 2\pi r' f}{2\pi r' - fh}.$$

Application. Pour Q = 9000 kil., $r = 1^m,00$, $r' = 0^m,034$, $r'' = 0^m,025$, $h = 0^m,016$ et $f = 0,08$, la formule (*a*) donne

$$P = 9000\left(\frac{0,034}{1} \times \frac{0,016 + 2 \times 3.14 \times 0,034 \times 0,08}{2 \times 3,14 \times 0.034 - 0.08 \times 0,016} + \frac{2 \times 0.025 \times 0,08}{3}\right) =$$
$$= 9000\,(0,005299 + 0,001333) = 9000 \times 0,006632 = 59^k,69;$$

au lieu de

$$P = 9000 \times 0,005299 = 47^k,69,$$

quand on ne tient pas compte du frottement du bout de la vis; ce frottement n'est donc pas négligeable.

77. ***Treuil.*** En négligeant les frottements des tourillons du treuil (*fig.* 7), on a, pour l'équilibre dynamique,

Fig. 7.



$$P \times 2\pi p = Q \times 2\pi q, \quad \text{d'où} \quad Pp = Qq.$$

- P puissance ou force motrice agissant dans un plan normal à l'axe du treuil;
- p bras de levier de P, par rapport à l'axe du treuil;

Q résistance vaincue agissant dans un plan normal à l'axe du treuil;
q bras de levier de Q, par rapport à l'axe du treuil.

Les forces P et Q peuvent ne pas être parallèles entre elles.

78. En tenant compte du frottement des tourillons du treuil, la formule précédente devient

$$Pp = Qq + fRr + fR'r',$$

f coefficient de frottement des tourillons sur leurs coussinets;
r et r' rayons des tourillons;
R et R' résultantes des composantes des trois forces : le poids du treuil, la puissance P et la résistance Q, décomposées chacune en deux autres agissant dans des plans normaux à l'axe, au milieu de la longueur des tourillons r et r' (*Int.*, 1010, 1023);
fRr et $fR'r'$ moments du frottement des tourillons.

Comme R et R' dépendent de Q, on résoudra l'équation précédente par tâtonnement : on déterminera d'abord Q en négligeant le frottement des tourillions (77) ; ayant Q, on déterminera les valeurs correspondantes de R et R', par les décompositions indiquées plus haut et (*fig.* 7) ; ces valeurs, substituées dans l'équation précédente, donneront une deuxième valeur de Q plus exacte que la première. Opérant sur cette seconde valeur de Q comme pour la première, on obtiendra une troisième valeur s'approchant encore plus de la vérité, et en continuant ainsi de suite, on obtiendra pour Q une valeur aussi exacte qu'on voudra. En pratique, on pourra généralement considérer la deuxième valeur de Q comme suffisamment approchée de la valeur réelle.

79. *Cabestan.* Si, outre les forces P et Q qui sollicitent le treuil en agissant dans des plans normaux à son axe, une force F agit parallèlement à cet axe, comme cela arrive dans les cabestans, qui ne sont autre chose que des treuils à axe vertical, dont le poids, au lieu de se reporter sur le contour des tourillons, agit sur la face horizontale du pivot inférieur, la formule posée pour le treuil (78) devient

$$Pp = Qq + fRr + fR'r' + f'F\frac{2}{3}r''.$$

$f'F\frac{2}{3}r''$ moment du frottement de la face horizontale du pivot (63);
f' coefficient de frottement qui peut être différent de celui du pourtour du pivot;
r'' rayon de la surface frottante horizontale du pivot.

80. *Frottement des engrenages.* Lorsqu'un corps se meut en roulant et glissant à la fois sur un autre corps, on admet que le travail total absorbé par les deux frottements est le même que si un simple frottement de glissement avait lieu sur la différence des arcs parcourus réciproquement par une surface sur l'autre, et un simple frottement de roulement sur le plus petit des arcs parcourus (*Int.*, 1258). Dans les engrenages, les deux mouvements de roulement et de glissement sont réunis,

et on trouve, en négligeant le frottement de roulement, qui est toujours très-faible (*Int.*, 1259),

$$T_m = T_u + T_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{r'+r}{rr'}\right) = T_u + T_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right).$$

T_m travail moteur dépensé par la roue qui conduit;
T_u travail utile dont on peut disposer sur l'arbre de la roue conduite;
$T_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right)$, travail absorbé par le frottement;
f coefficient de frottement, variable suivant la nature des dents et la manière dont elles sont graissées (60);
a pas de l'engrenage; c'est la distance d'axe en axe de deux dents consécutives, prise sur la circonférence primitive;
r et r' rayons des circonférences primitives des deux roues.

La formule fait voir que, pour des roues de rayons donnés, le travail absorbé par le frottement est proportionnel au pas.

Pour les engrenages cylindriques, on peut mettre la formule précédente sous la forme plus commode

$$T_m = T_u + T_u f\pi\left(\frac{1}{n}+\frac{1}{n'}\right).$$

n et n' nombres des dents contenues dans les engrenages.

Application. On a $T_m = 300^{km}$ par seconde, la roue motrice a 100 dents et le pignon 21, le graissage des dents est bien fait et donne $f = 0{,}08$; il s'agit de savoir quel sera le travail T_u que pourra transmettre l'arbre du pignon dans une seconde.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la dernière expression de T_m, on a

$$300 = T_u + T_u \times 0.08 \times 3.14\left(\frac{1}{100}+\frac{1}{21}\right),$$

d'où l'on tire

$$T_u = \frac{300}{1+0.0145} = 295^{km}.71.$$

Le travail absorbé par le frottement en une seconde est égal à

$$T_m - T_u = 300 - 295.71 = 4^{km}.29.$$

81. Pour les *engrenages coniques*, on fait usage de la première formule (80); seulement, au lieu de prendre pour r et r' les rayons des engrenages, on prend les perpendiculaires à la génératrice de contact, prolongées jusqu'aux axes des engrenages; ainsi p et p' étant ces perpendiculaires (*fig.* 8), on a

Fig. 8.

$$T_m = T_u + T_u \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}\right).$$

82. Pour une crémaillère commandée par une roue d'engrenage ou commandant une roue d'engrenage, on a (*Int.*, 1260),

$$T_m = T_u + T_u \frac{fa}{2} \times \frac{1}{r},$$

a pas de l'engrenage et de la crémaillère ;
r rayon de la circonférence primitive de l'engrenage.

83. Suivant que les engrenages métalliques sont exécutés avec plus ou moins de soin, l'intervalle entre deux dents consécutives est égal à l'épaisseur de la dent, augmentée de 1/20 à 1/10 de cette épaisseur, c'est-à-dire qu'il y a de 1/20 à 1/10 de jeu entre les dents engrenées; ce jeu varie de 1/10 à 1/6 pour les engrenages à dents de bois.

Pour rendre le frottement des engrenages le plus petit possible, on fait les surfaces de contact en épicycloïde ou en développante de cercle (*Int.*, 954 et 970); mais, à cause des difficultés d'exécution, pour les engrenages ordinaires, on se contente d'arcs de cercle décrits avec le pas de l'engrenage pour rayon, et d'un centre pris sur la circonférence primitive ou de contact; des constructeurs prennent les 3/4 du pas pour rayon. Le reste des joues de chaque dent est un plan tangent à ces arcs et passant par le centre de la roue. C'est surtout pour les petits pignons à grosses dents s'engrenant avec de grandes roues, qu'il faut avoir recours aux tracés en développantes ou en épicycloïdes.

Pour les engrenages coniques, il faudrait prendre des développantes ou des épicycloïdes sphériques; mais on se contente également d'arcs de cercle. (Voir la résistance des matériaux pour les dimensions des différentes parties des roues d'engrenage.)

84. *Travail absorbé par le frottement du bouton d'une manivelle.* Pour obtenir ce travail, on développe la circonférence du bouton de la manivelle, et on élève aux différents points de ce développement, que l'on considère comme axe des abscisses, des perpendiculaires ou ordonnées représentant l'intensité du frottement correspondant à ces différents points; l'aire de la courbe ainsi obtenue, que l'on peut calculer à l'aide de la formule de Thomas Simpson (*Int.*, 987), représente le travail absorbé par le frottement pour une révolution.

L'intensité du frottement correspondant à un point quelconque de l'axe des abscisses est représentée par le coefficient de frottement multiplié par la pression qu'exerce la bielle sur le bouton de la manivelle, au moment où son axe rencontre ce bouton au point considéré.

Si la bielle exerce un effort constant sur le bouton de la manivelle, le travail absorbé par le frottement est le même que pour un tourillon ordinaire (63), et, pour une révolution de la manivelle, on a

$$T_n = 2\pi r f P.$$

T_n travail absorbé;
r rayon du bouton de la manivelle;
f coefficient de frottement;
P pression constante de la bielle sur le bouton de la manivelle.

Cette formule fait voir que le travail absorbé est proportionnel au rayon r, qu'il faudra par conséquent prendre le plus petit possible. Aussi doit-on éviter l'emploi des excentriques pour la transmission des grands efforts, l'expression du travail absorbé par le frottement étant la même que pour le bouton d'une manivelle, et r étant très-graud, puisque c'est le rayon de figure de l'excentrique.

85. Une *manivelle* peut être *à double effet* ou *à simple effet*. Dans le premier cas, qui est celui supposé formule n° 84, la force qui agit sur la bielle est dirigée dans un sens pendant la première moitié de la révolution de la manivelle, et dans l'autre sens pendant la seconde moitié. Dans le deuxième cas, la force n'agit que dans un sens et ne sollicite la manivelle que pendant la moitié de sa révolution; de telle sorte que le travail absorbé par le frottement, pour une révolution complète de la manivelle, n'est que

$$\pi r f P.$$

86. *Équilibre dynamique d'une manivelle à double effet.* Cet équilibre ne peut être que périodique (48), et on doit avoir, pour une période ou un tour de manivelle, en négligeant les frottements:

$$Q \times 2\pi R = F \times 4R, \text{ d'où } Q = \frac{2}{\pi} F.$$

Q résistance agissant sur l'arbre de la manivelle à l'extrémité d'un bras de levier que l'on suppose égal au rayon de la manivelle;
R rayon de la manivelle;
$2\pi R$ chemin parcouru par la résistance Q pour un tour de manivelle;
$Q \times 2\pi R$ travail absorbé par la résistance Q, aussi pour un tour de manivelle;
F force agissant sur l'axe de la bielle, que l'on suppose assez longue pour qu'on puisse la considérer comme restant toujours parallèle à elle-même, et négliger sa variation de direction;
4 R espace parcouru par la puissance F pour un tour de manivelle, c'est-à-dire pour une allée et une venue de la bielle;
$F \times 4R$ travail développé par la puissance F, aussi pour un tour de manivelle ou une allée et une venue de la bielle.

Pendant chaque demi-révolution de la manivelle, le moment de la puissance F, par rapport à l'axe de la manivelle, varie pour toutes les positions de la bielle, et les valeurs minimum, moyenne et maximum de ce moment, valeurs qui sont les mêmes pour un tour entier de manivelle, sont respectivement:

$$F \times 0, \quad F \times \frac{2}{\pi} R, \quad F \times R;$$

quantités qui sont dans le rapport des nombres :

$$0, \qquad 0.637, \qquad 1,$$

ou

$$0, \qquad 1, \qquad 1.57.$$

La grande différence de ces nombres proportionnels fait voir combien la marche d'une manivelle est irrégulière.

87. *Équilibre dynamique de deux manivelles à double effet montées à angle droit sur le même arbre.* Chaque manivelle agit en particulier comme dans le cas précédent, et leur ensemble ne peut encore donner qu'un équilibre dynamique périodique, pour lequel on doit avoir, pour un tour des manivelles et en négligeant les frottements :

$$Q \times 2\pi R = 2F \times 4R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2}{\pi} \times 2F.$$

Q et R ont les mêmes significations que dans le cas précédent;
F force qui agit suivant l'axe de chacune des bielles.

Les sommes de moments minimum, moyenne et maximum des forces F, pour une révolution des manivelles, sont successivement :

$$F \times R, \quad 2F \times \frac{2}{\pi} R, \quad 2F \times \frac{R}{\sqrt{2}};$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

$$1, \qquad 1{,}274, \qquad 1{,}414,$$

ou

$$0.783, \qquad 1, \qquad 1.107.$$

88. *Équilibre dynamique de trois manivelles à double effet, montées sur le même arbre et faisant entre elles des angles égaux.* Cet équilibre ne peut encore être que périodique, et on doit avoir pour une période, en négligeant les frottements :

$$Q \times 2\pi R = 3F \times 4R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2}{\pi} \times 3F.$$

Les lettres ont les mêmes significations que dans le cas précédent, et les sommes de moments minimum, moyenne et maximum des forces F, pour une révolution des manivelles, sont successivement :

$$FR\sqrt{3}, \quad 3F\frac{2}{\pi}R, \quad 2FR;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

1.73, 1.91, 2,

ou

0.905, 1, 1.046.

En employant 5, 7, 11..... manivelles convenablement disposées, on augmenterait encore la régularité du mouvement; mais les grandes difficultés d'ajustage et les complications du mécanisme font renoncer à l'emploi de plus de trois manivelles montées sur le même arbre.

89. *Équilibre dynamique d'une manivelle à simple effet* (85). Cet équilibre est encore périodique, et on doit avoir, pour une révolution complète de la manivelle, en négligeant les frottements :

$$Q \times 2\pi R = F \times 2R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{F}{\pi}.$$

Cela suppose que la résistance Q agit, comme pour une manivelle à double effet, pendant la révolution complète.

Les moments, minimum, moyen et maximum de la force, pour une révolution complète de la manivelle, sont successivement :

$$F \times 0, \quad F \times \frac{R}{\pi}, \quad F \times R;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

0, 0.318, 1,

ou

0, 1, 3.14.

90. *Bielle.* Pour qu'une bielle transmette le plus convenablement possible, à une manivelle, l'effort qui la sollicite, il faut que sa longueur soit la plus grande possible; mais, afin de ne pas être obligé de lui donner une section trop considérable, on se contente de faire sa longueur égale à 5 ou 6 fois le rayon de la manivelle.

91. *Volant pour une manivelle à simple effet, et à double effet.* Afin de rendre possible la marche d'une manivelle, et de régulariser plus ou moins son mouvement, on fait usage d'un volant qui accumule l'excès du travail moteur sur le travail résistant quand ce premier est supérieur au second, pour le restituer quand le travail résistant devient supérieur au travail moteur.

Pour une manivelle à simple effet, le poids du volant est donné par la formule

$$PV^2 = 0.5511 \times F2R \times gK, \qquad (a)$$

de laquelle on conclut

$$P = \frac{24324n}{mV^2} K. \qquad (b)$$

Pour une manivelle à double effet, on a

$$PV^2 = 0.2105 \times F2R \times gK, \qquad (c)$$

d'où

$$P = \frac{4645n}{mV^2} K. \qquad (d)$$

P Poids du volant ou plutôt de sa jante, car on néglige la régularité due aux bras et au moyeu dans l'établissement de ces formules;
V vitesse moyenne de la jante du volant;
F force agissant suivant l'axe de la bielle;
R rayon de la manivelle;
n puissance de la force F en chevaux;
m nombre de tours du volant par minute;
K coefficient de régularité du mouvement; sa valeur dépend du genre de travail à produire.

Pour une manivelle à simple effet, on conclut (89)

$$n \times 75^{km} = \frac{F \times 2R}{60} m,$$

et pour une manivelle à double effet (86),

$$n \times 75^{km} = \frac{F4R}{60} m.$$

C'est à l'aide de ces relations que l'on passe des formules (a) et (c) à celles (b) et (d).

Pour deux manivelles à double effet montées à angle droit sur le même arbre, la formule d devient

$$P = \frac{468n}{mV^2} K.$$

Pour les machines à vapeur à basse pression, Watt fait, dans les cas ordinaires de la pratique, $K = 32$; ce coefficient varie de 35 à 40 quand les machines commandent des filatures où l'on fabrique les *numéros* 40 à 60, et de 50 à 60 pour des filatures à *numéros* très-fins (voir la 3[e] partie).

Le *numéro* d'un fil de coton est le nombre d'écheveaux de 1000 mètres pesant ensemble un demi-kilogramme. Ainsi le demi-kilogramme du numéro 50 contient 50 écheveaux.

K atteint parfois la valeur 25 pour des machines ou des usines qui n'ont pas besoin d'une grande régularité de mouvement, comme des scieries, des moulins à blé, des pompes, etc., et il atteint même 20 pour des marteaux de forge (117).

L'examen des formules précédentes fait voir que le poids du volant est d'autant plus petit que la vitesse de la jante est plus grande. L'expérience prouve que cette vitesse peut atteindre 25 à 30 mètres par seconde, mais qu'il est dangereux de dépasser cette limite.

Le rayon du volant est ordinairement égal à 5 ou 6 fois celui de la manivelle.

Application. En appliquant la formule (d) à une machine à basse pression, de la force de 40 chevaux, faisant marcher la filature de Lo-

gelbach, près Colmar, on trouve, pour le poids de la jante du volant, 9320 kilog., au lieu de 9450 kilog., comme l'avaient adopté les constructeurs MM. Watt et Boulton.

Le diamètre moyen de la jante est de 6m,10, et le nombre de tours du volant, 19 par minute, ce qui donne une vitesse de 6m,06 par seconde. Les numéros des fils de coton varient de 40 à 60, ce qui a fait adopter 35 pour la valeur de K.

92. *Volant pour une manivelle à simple effet et à contre-poids.* Si, sur le prolongement d'une manivelle, au delà de son centre de rotation, on place un contre-poids tel que le travail qu'il absorbera en s'élevant et restituera en descendant soit moitié de celui que produit la force motrice pour la 1/2 révolution pendant laquelle elle agit, cette manivelle agira comme une manivelle à double effet, et le poids du volant sera donné par la formule

$$PV^2 + Qv^2 = \frac{4645n}{m} K.$$

P, V, n, m, K, ont les mêmes significations qu'au n° précédent;
Q poids du contre-poids;
v vitesse moyenne du centre de gravité du contre-poids.

Remarque. Les formules des nos 91 et 92 s'appliquent encore au cas où le volant n'est pas placé sur l'arbre même de la manivelle, pourvu que m exprime toujours le nombre de tours de la manivelle par minute, tandis que V et v expriment les vitesses de la jante du volant et du contre-poids; mais en pratique il faut toujours placer le volant sur l'arbre des organes qui rendent irrégulière la transmission ou l'absorption du travail moteur, et le plus près possible de ces organes.

93. *Équilibre dynamique de l'excentrique.* Dans une transmission de mouvement au moyen d'un excentrique, l'équilibre est périodique, et on doit avoir

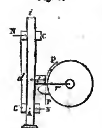
$$P \times 2\pi R = 4Fd + fF \times 2\pi r.$$

P puissance qui agit sur l'arbre de l'excentrique;
R bras de levier de la puissance;
F résistance appliquée à la bielle que met en mouvement l'excentrique;
d distance du centre de rotation au centre de figure de l'excentrique, ou 1/2 espace parcouru par la résistance pour une demi-révolution de l'excentrique;
f coefficient du frottement au pourtour de l'excentrique:
r rayon de figure de l'excentrique;
$P \times 2\pi R$ travail dépensé par la puissance pour une révolution de l'excentrique;
$4Fd$ travail utile produit id.
$fF \times 2\pi r$ travail absorbé par le frottement id.

L'excentrique présente les mêmes irrégularités de mouvement que la manivelle (86, 87, 88, 89).

94. *Équilibre dynamique du pilon* (*Int.*, 1261). Supposant que la puissance agit verticalement sous le mentonnet, pendant toute la course d'un pilon guidé par deux prisons, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir par levée

Fig. 9.



$$\mathcal{T}_m \text{ ou } Ph = Qh\frac{d}{d-2lf} \qquad (a)$$

P force motrice agissant verticalement à l'extrémité du mentonnet;
h levée du pilon;
P*h* travail moteur dépensé par levée de pilon;
Q poids du pilon et de sa tige;
Q*h* travail utile produit;
d distance d'axe en axe des deux prisons ou guides;
l longueur du mentonnet ou distance du point d'application de la puissance à l'axe de la tige;
i épaisseur de la tige dans le sens de *l*;
f coefficient de frottement de la tige sur ses guides.

La formule précédente fait voir que le travail utile Q*h* est d'autant plus petit pour un même travail moteur P*h*, que *l* est plus grand, et que si l'on suppose $l = 0$, c'est-à-dire que la force P est appliquée à l'axe de la tige et agit suivant cet axe, on a

$$Ph = Qh.$$

Ce qui fait voir que le travail utile est alors égal au travail moteur, et que par conséquent le frottement contre les prisons est nul.

Quand le pilon est soulevé par une came, comme cela a lieu ordinairement, le travail absorbé par le frottement de la came sous le mentonnet est analogue à celui absorbé par le frottement d'un pignon s'engrenant avec une crémaillère (82); seulement le pas *a* est remplacé par *h*. En tenant compte de ce frottement, et en supposant que son coefficient est le même que pour les prisons, la formule (*a*) devient

$$\mathcal{T}_m = Qh\frac{d\,(2r+fh)}{2r\,(d-2lf+f^2i)}.$$

n étant le nombre des coups de pilon donnés pendant une révolution de l'arbre à cames, et P la force motrice tangentielle qui agit à l'extrémité du rayon *r*, on doit avoir, pour l'équilibre dynamique,

$$n\,\mathcal{T}_m = 2\pi r\mathrm{P},$$

d'où

$$\mathrm{P} = \frac{n\,\mathcal{T}_m}{2\pi r} = nQh\frac{d\,(2r+fh)}{4\pi r^2\,(d-2lf+f^2i)}.$$

Les cames se font en développante de cercle (*Int.*, 954).

La durée totale d'un coup de pilon se compose du temps t que met la came à élever le pilon à la hauteur h, du temps $t' = \sqrt{2gh}$ que met le pilon à descendre, et de 1/10 à 1/6 de $t + t'$ pour le temps que met le pilon à agir sur la matière, qui peut être plus ou moins compressible.

95. *Choc des corps solides.* Quand deux corps solides, en vertu de vitesses acquises sous l'influence de causes quelconques, tendent à occuper au même instant une même partie de l'espace, dès qu'ils arrivent à être ce qu'on appelle en contact, il se déclare des actions mutuelles répulsives qui atteignent un degré suffisant d'intensité pour modifier en grandeur ou en direction, ou à la fois en grandeur et en direction, les vitesses primitives des deux corps, de manière que ceux-ci ne viennent pas occuper la même portion de l'espace au même instant et par là satisfont à la loi générale de l'*impénétrabilité de la matière* (*Int.*, 1190 et suivants).

Lorsque deux corps se rapprochent ainsi de manière à donner naissance à ces actions mutuelles par leurs changements plus ou moins sensibles de formes, on dit qu'il y a *choc* ou *collision* entre les deux corps.

Le choc de deux corps n'influe en rien sur le mouvement du centre de gravité du système, mouvement qui ne dépend en intensité et en direction que des forces extérieures (*Int.* 1233).

96. *Vitesse du centre de gravité de l'ensemble de deux corps solides après leur choc* (*Int.*, 1234).

Supposons le cas le plus simple, celui où les centres de gravité des deux corps se meuvent suivant une même droite par rapport à laquelle les deux corps sont symétriques. C'est à ce cas que l'on ramène les applications pratiques sur le choc.

Le centre de gravité de l'ensemble se mouvra sur la droite suivie par les deux corps, comme si le choc n'avait pas lieu: de plus, il est évident que la vitesse de chacun des corps en particulier ne changera pas de direction, mais bien d'intensité, et même l'une pourra changer de signe.

Soient m et m' les masses des deux corps, v et v' leurs vitesses respectives avant le choc, et u la vitesse du centre de gravité.

Dès que le choc commence, les actions mutuelles égales agissent en sens contraire sur chacune des deux masses, et produisent des changements de formes et des vibrations qui dépendent de la nature et de la forme des corps.

Si la différence des vitesses v et v' des deux corps, c'est-à-dire leur vitesse relative, est faible, et que les corps aient une certaine consistance, on peut admettre que le changement de forme pendant le choc s'étend à peu de distance du point de contact, et que les vibrations des molécules sont très-faibles; d'où il résulte que le mouvement de toutes

les molécules de chacun des corps peut être considéré comme n'étant qu'un simple mouvement de translation, qui est le même pour toutes les molécules.

En se plaçant dans cette hypothèse, V étant la vitesse commune à tous les points et au centre de gravité de la masse m à un instant quelconque du choc, et V' celle de tous les points et du centre de gravité de la masse m' au même instant, on a, en négligeant pendant le choc les impulsions des forces extérieures, s'il y en a, ce que l'on peut faire puisque la durée du choc est très-petite,

$$mV + m'V' = mv + m'v'.$$

Il y a toujours, pendant le choc, un instant où les centres de gravité des deux corps ont la même vitesse, qui est aussi la vitesse u du centre de gravité du système ; à cet instant, l'équation précédente devient

$$(m + m')\,u = mv + m'v',$$

d'où

$$u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

u est la vitesse du centre de gravité, et sensiblement aussi celle de tous les points du système à l'instant considéré, dans le cas de très-faibles vibrations.

Lorsque les deux corps ne sont pas élastiques, c'est-à-dire quand ils conservent les formes que des forces quelconques peuvent leur donner, les actions mutuelles cessent leur effet dès que la vitesse u est devenue commune aux deux corps ; alors les deux corps se meuvent en restant en contact, tant que des forces extérieures ne viennent pas modifier leur vitesse commune u.

Les formules précédentes s'appliquent aux cas où les corps marchent en sens contraires, comme à ceux où ils vont dans le même sens ; seulement il faut avoir égard aux signes qu'il convient de donner aux valeurs de v et v', et par suite à celles de mv et $m'v'$. Le signe de u est toujours celui de la plus grande quantité de mouvement.

Si les deux quantités de mouvement sont égales et de signes contraires, la formule précédente donne $u = 0$, ce qui montre que les corps arrivent au repos, et y restent s'ils sont dénués d'élasticité.

Dans le cas où l'une des masses est au repos, c'est-à-dire où l'on a $v' = 0$, l'équation précédente devient

$$(m + m')\,u = mv, \quad \text{d'où} \quad u = \frac{mv}{m + m'}. \qquad (a)$$

97. *Perte de puissance vive due au choc de deux corps non élastiques.*

Si les corps restent unis après s'être comprimés, et qu'on néglige les

vibrations auxquelles peuvent être soumises les molécules des deux corps, il y a perte de puissance vive dans le système, puisque, pendant la compression des deux corps, et jusqu'au moment où la même vitesse est devenue commune aux deux corps, les molécules voisines du contact se sont rapprochées, et par suite les actions mutuelles répulsives de ces molécules ont produit un travail négatif, d'où il est résulté une perte de puissance vive (*Int.*, 1195).

Le travail dû aux forces moléculaires, et par suite la perte de puissance vive du système, ne dépendant que du mouvement relatif des deux corps, il en résulte que pour calculer cette perte, on peut supposer que l'un des corps est en repos et que l'autre vient le choquer avec une vitesse absolue égale à la vitesse relative du système.

Soit donc v la vitesse de la masse choquante m, et $v'=0$ la vitesse de la masse choquée m'.

La puissance vive du système avant le choc est $\frac{1}{2}mv^2$. Après le choc, toutes les molécules des deux corps ayant la même vitesse u, à cet instant la puissance vive du système est (28)

$$\frac{1}{2}(m+m')u^2.$$

La perte de puissance vive due au choc est alors

$$\varphi=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}(m+m')u^2.$$

Remplaçant dans cette expression u par sa valeur (a) (96), on obtient

$$\varphi=\frac{1}{2}\frac{mm'v^2}{m+m'}.$$

Établissant un certain rapport entre m' et m, c'est-à-dire faisant $m'=\mathrm{N}m$, on conclut

$$\varphi=\frac{1}{2}mv^2\frac{1}{1+\frac{1}{\mathrm{N}}}.$$

Formule qui fait voir que la perte de puissance vive est d'autant plus petite que la valeur de N est plus petite, c'est-à-dire que la masse choquante est plus grande par rapport à la masse choquée.

98. *Corps exécutant un mouvement de rotation autour d'un axe fixe.* On appelle *vitesse angulaire* d'un corps tournant autour d'un axe, la longueur de l'arc décrit, ou qui serait décrit si le mouvement en restant uniforme était suffisamment prolongé, pendant l'unité de temps, par un point situé à l'unité de distance de l'axe et lié invariablement au corps.

ω étant la vitesse angulaire d'un corps, et v la vitesse d'un quelconque de ses points, situé à une distance r de l'axe, on a, en remarquant que les vitesses des divers points sont en raison inverse de leurs distances à l'axe,

$$v : \omega :: r : 1, \quad \text{d'où} \quad v = \omega r, \quad \text{et} \quad \omega = \frac{v}{r}.$$

99. ***Puissance vive d'un corps tournant autour d'un axe fixe.*** Lorsqu'un élément matériel m tourne autour d'un axe, sa vitesse étant ωr, sa puissance vive est (28)

$$\frac{1}{2} m\omega^2 r^2.$$

Lorsqu'un corps quelconque tourne, chacun de ses points matériels possède une puissance vive d'une expression analogue à la précédente; en faisant la somme de toutes ces puissances vives élémentaires, on a la puissance vive du corps, qui peut alors être représentée par

$$P = \Sigma \frac{1}{2} m\omega^2 r^2,$$

Σ signifiant somme.

Comme $\frac{1}{2}\omega^2$ est commun à toutes les parties de cette somme, on peut le mettre en facteur commun, et poser

$$P = \frac{1}{2}\omega^2 \Sigma m r^2.$$

mr^2, produit d'un élément matériel par le carré de sa distance à l'axe de rotation, est ce quon appelle *le moment d'inertie de l'élément* m *par rapport à l'axe.*

Σmr^2, somme des moments d'inertie de tous les éléments matériels d'un corps par rapport à un axe, est *le moment d'inertie du corps par rapport à cet axe.*

La formule précédente fait voir que *la puissance vive d'un corps tournant autour d'un axe fixe est, à un instant quelconque, égale à la moitié du produit du carré de la vitesse angulaire du corps à cet instant par le moment d'inertie du corps par rapport à l'axe de rotation.*

100. *Rayon de gyration.* Il existe une valeur R de r telle, que si toute la masse $M = \Sigma m$ du corps se trouvait à la distance R de l'axe, la puissance vive, et par suite le moment d'inertie, pour une même vitesse angulaire, par rapport au même axe, n'auraient pas changé.

R est ce qu'on appelle le *rayon de gyration.*

Posant (99)

$$P = \frac{1}{2}\omega^2 \Sigma mr^2 = \frac{1}{2}\omega^2 R^2 \Sigma m = \frac{1}{2}\omega^2 MR^2,$$

où

$$\Sigma mr^2 = R^2\Sigma m = MR^2, \qquad (a)$$

n a

$$R^2 = \frac{\Sigma mr^2}{\Sigma m} = \frac{\Sigma mr^2}{M}.$$

Lorsque les corps sont homogènes, on peut substituer aux masses élémentaires m, les volumes élémentaires u, qui leur sont proportionnels, dans l'équation (a), qui devient

$$\Sigma ur^2 = R^2\Sigma u = UR^2, \quad \text{d'où} \quad R^2 = \frac{\Sigma ur^2}{U},$$

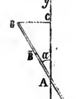
et alors le rayon de gyration peut être défini et déterminé indépendamment de toute notion de mécanique.

La détermination des rayons de gyration des corps homogènes et de figures géométriques est du domaine du calcul intégral. Nous allons énoncer leurs valeurs pour les corps ayant des formes employées en pratique.

Ayant le rayon de gyration, MR^2 donnera le moment d'inertie, et $\frac{1}{2}\omega^2MR^2$ la puissance vive. P étant le poids du corps tournant, on a $M = \frac{P}{g}$, et par suite

$$MR^2 = \frac{P}{g}R^2, \quad \text{et} \quad \mathcal{P} = \frac{1}{2}\omega^2\frac{P}{g}R^2.$$

101. *Pour une tige homogène* AB *d'une très-petite section, tournant autour de l'axe* Ay *passant par son extrémité*, on a (*Int.*, 1168)



$$R^2 = \frac{1}{3}\overline{BC}^2.$$

Le moment d'inertie est alors, P étant le poids de la tige (100),

$$\frac{P}{g}R^2 = \frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2,$$

et la puissance vive,

$$\frac{1}{6}\frac{P}{g}\omega^2\overline{BC}^2.$$

Pour la tige BB', *qui est rencontrée par l'axe en un point quelconque de sa longueur*, r étant le rayon de gyration de la partie AB, et r' celui de la partie AB', on a

$$r^2 = \frac{1}{3}\overline{BC}^2 \quad \text{et} \quad r'^2 = \frac{1}{3}\overline{B'C'}^2;$$

P et P' étant les poids des parties AB et AB' de la tige, les moments d'inertie de ces parties sont respectivement :

$$\frac{P}{g}r^2=\frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2 \quad \text{et} \quad \frac{P'}{g}r'^2=\frac{1}{3}\frac{P'}{g}\overline{B'C'}^2.$$

Le moment d'inertie de la tige totale étant égal à la somme des moments d'inertie des deux parties, on a donc, R étant le rayon de gyration de la tige totale,

$$\frac{P+P'}{g}R^2=\frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2+\frac{1}{3}\frac{P'}{g}\overline{B'C'}^2, \quad \text{d'où} \quad R^2=\frac{\frac{1}{3}P\overline{BC}^2+\frac{1}{3}P'\overline{B'C'}^2}{P+P'}.$$

Dans le cas où le point A est le milieu, c'est-à-dire le centre de gravité de la tige, on a B'C' = BC, P' = P, ou P + P' = 2P, et la formule précédente donne

$$R^2=\frac{1}{3}\overline{BC}^2.$$

Ce qui fait voir que le rayon de gyration de la tige totale est le même que celui de chacune de ses parties considérées séparément.

Si l'axe rencontrait le prolongement de la tige BB'', on remarquerait que le moment d'inertie de BB'' est la différence des moments d'inertie des tiges BA et B''A, et on l'obtiendrait en suivant la même marche que pour déterminer le moment d'inertie de BB'. Du reste, nous verrons n° 113 comment, étant connu le moment d'inertie d'un corps par rapport à un axe passant par son centre de gravité, on peut déterminer son moment d'inertie par rapport à un axe quelconque parallèle au premier.

102. *Pour une tige en arc de cercle* AB, *d'une très-petite section, tournant autour de son rayon* OA *passant par une de ses extrémités*, on a

Fig. 11.

$$R^2=\frac{1}{2}\rho^2\left(1-\frac{1}{2}\frac{\rho}{l}\sin 2\alpha\right). \qquad (a)$$

ρ = OA rayon de courbure de la tige ;
l = arc AB longueur de la tige ;
α angle au centre correspondant à l'arc AB.

Pour un quart de cercle, ou un demi-cercle, ou trois quarts de cercle..., c'est-à-dire pour $\alpha=90°$, $\alpha=180°$, $\alpha=270°$... on a $\sin 2\alpha=0$, et, par suite,

$$R^2=\frac{1}{2}\rho^2.$$

Ayant R^2, on aura le moment d'inertie en multipliant par la masse $\frac{P}{g}$ de la tige, et ce moment d'inertie multiplié par $\frac{1}{2}\omega^2$, moitié du carré

de la vitesse angulaire à un certain instant, donnera la puissance vive à cet instant.

A l'aide de la formule (*a*), et en suivant la même marche qu'au numéro précédent, on déterminera le rayon de gyration, le moment d'inertie et la puissance vive, soit que l'axe OA rencontre l'arc AB en un point quelconque compris entre A et B, soit qu'il rencontre le prolongement de cet arc.

On verrait encore que quand l'axe rencontre l'arc au milieu, c'est-à-dire quand il passe par son centre de gravité, le rayon de gyration de l'arc entier est le même que pour chacune des deux moitiés prises séparément.

103. *Pour un disque en quart de cercle d'une très-faible et uniforme épaisseur*, tournant autour d'un des rayons qui le limite, ou pour un demi-cercle qui tourne autour du diamètre qui le limite, ou encore pour trois quarts de cercle ou pour un cercle entier, on a

$$R^2 = \frac{1}{4}\rho^2,$$

ρ étant le rayon du disque.

Ayant R^2, on obtiendra facilement le moment d'inertie, puisque connaissant les dimensions du disque on peut calculer son volume, lequel multiplié par la densité de la matière donne le poids du disque. Ayant le moment d'inertie, on obtient la puissance vive en le multipliant par la moitié du carré de la vitesse angulaire (100).

104. *Un cylindre droit à base circulaire tournant autour de son axe, ou un secteur quelconque de ce cylindre tournant autour de cet axe*, donne, R étant le rayon de gyration et ρ le rayon du cylindre,

$$R^2 = \frac{1}{2}\rho^2.$$

Ayant R^2, on détermine le moment d'inertie, puis la puissance vive, comme au numéro précédent.

105. *Pour une jante à section rectangulaire, ou pour une portion de cette jante tournant autour de l'axe*, on a

$$R^2 = \frac{1}{2}(\rho^2 + \rho'^2),$$

ou, en remplaçant les rayons intérieur et extérieur ρ et ρ' de la jante en fonction du rayon moyen $\rho_1 = \frac{\rho + \rho'}{2}$ et de la dimension de la jante mesurée suivant le rayon, $b = \rho - \rho'$,

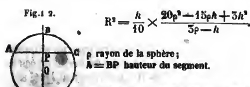
$$R^2 = \rho_1^2\left(1 + \frac{1}{4}\frac{b^2}{\rho_1^2}\right).$$

106. *Un cône droit à base circulaire tournant autour de son axe donne, ρ étant le rayon de cette base*,

$$R^2 = \frac{3}{10}\rho^2.$$

107. *Pour un tronc de cône tournant autour de son axe*, on remarquerait que le moment d'inertie du tronc est égal au moment d'inertie du cône total, moins le moment d'inertie du cône retranché pour obtenir le tronc. Ayant le moment d'inertie du tronc, en le divisant par la masse $\frac{P}{g}$ du tronc, on aurait R^2.

108. *Un segment sphérique à une base*, ABC, *tournant autour du diamètre* BB′ *perpendiculaire au plan de sa base*, *c'est-à-dire passant par son centre de gravité*, on a



$$R^2 = \frac{h}{10} \times \frac{20\rho^2 - 15\rho h + 3h^2}{3\rho - h}.$$

ρ rayon de la sphère;
h = BP hauteur du segment.

Pour une demi-sphère, $h = \rho$, et la formule précédente devient

$$R^2 = \frac{2}{5}\rho^2.$$

Pour la sphère entière, R^2 a aussi cette dernière valeur.

109. *Pour une zone sphérique à une base*, ABC (fig. 12), *tournant autour du diamètre* BB′ *perpendiculaire à sa base*, *l'épaisseur de la calotte étant très-mince*, on a, ρ et h ayant les mêmes significations qu'au n° précédent,

$$R^2 = h\left(\rho - \frac{h}{3}\right).$$

Si la calotte était une demi-sphère, on aurait $h = \rho$, et, par suite,

$$R^2 + \frac{2}{3}\rho^2.$$

Pour une sphère creuse entière et très-mince, on aurait aussi cette dernière valeur pour R^2.

110. *Un parallélipipède rectangle ayant* a, b, c *pour arêtes, et tournant autour de l'arête* c, *donne* (*Int.*, 1177).

Fig. 13.

$$R^2 = \frac{1}{3}(a^2 + b^2). \qquad (a)$$

Si le parallélipipède, au lieu de tourner autour de c, *tournait autour d'un axe parallèle à* c *et mené par le milieu de* b, on aurait

$$R^2 = \frac{1}{3}\left(a^2 + \frac{1}{4}b^2\right).$$

Ce qui revient à remplacer b par $\frac{1}{2}b$ dans la formule (a).

Si l'axe était mené parallèlement à c *et par le centre de figure, qui est aussi le centre de gravité*, il faudrait, dans la formule (a), remplacer b par $\frac{1}{2}b$ et a par $\frac{1}{2}a$, d'où il résulterait

$$R^2 = \frac{1}{12}(a^2 + b^2).$$

111. *Pour un ellipsoïde quelconque*, c'est-à-dire pour un ellipsoïde dont le plan perpendiculaire au grand axe $2a$ détermine, non pas un cercle de diamètre $2b$, comme pour l'ellipsoïde de révolution (*Int.*, 902), mais une ellipse ayant $2b$ et $2c$ pour axes, suivant que l'ellipsoïde tourne autour de l'axe $2c$, ou $2b$, ou $2a$, on a respectivement :

$$R^2 = \frac{1}{5}(a^2 + b^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(a^2 + c^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(b^2 + c^2).$$

Lorsque l'ellipsoïde est de révolution, on a $c = b$, et les trois formules précédentes se réduisent aux deux suivantes :

$$R^2 = \frac{1}{5}(a^2 + b^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(b^2 + b^2) = \frac{2}{5}b^2,$$

applicables respectivement au cas où l'ellipsoïde tourne autour de son petit ou grand axe.

Le volume de l'ellipsoïde quelconque étant $\frac{4}{3}\pi abc$, et celui de l'ellipsoïde de révolution $\frac{4}{3}\pi a^2 b$ ou $\frac{4}{3}\pi b^2 a$, suivant que l'ellipse génératrice tourne autour du petit ou grand axe (*Int.*, 904), multipliant ce volume par la densité de la matière, on aura le poids P; on en conclura la masse $\frac{P}{g}$, et par suite le moment d'inertie $\frac{P}{g}R^2$.

Faisant $a = b = \rho$, les formules relatives à l'ellipsoïde de révolution donnent

$$R^2 = \frac{2}{5}\rho^2.$$

Ce qui devait être, puisqu'alors l'ellipsoïde est une sphère (108).

112. *Pour un cylindre droit à base demi-parabolique* ABC′, *tournant autour de l'arête qui se projette en* A, *on a*

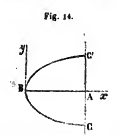


Fig. 14.

$$R^2 = \frac{1}{5}\left(\frac{8}{7}a^2 + b^2\right),$$
$$a = AB,$$
$$b = AC'.$$

Pour un cylindre droit à base parabolique CBC′, on aurait la même valeur pour R^2.

On a (*Int.*, 944) surface ABC′ $= \frac{2}{3}ab$; connaissant la hauteur du cylindre, on déterminera son volume, puis son poids, et ensuite le moment d'inertie.

113. R étant le rayon de gyration d'un corps par rapport à un axe quelconque, et R′ celui par rapport à l'axe passant par le centre de gravité du corps, on a, en appelant K la distance des deux axes,

$$MR^2 = MR'^2 + MK^2, \quad \text{d'où} \quad R^2 = R'^2 + K^2.$$

Ce qui fait voir que le carré du rayon de gyration d'un système par rapport à un axe quelconque, est égal au carré du rayon de gyration du même système par rapport à l'axe mené parallèlement au premier par le centre de gravité, plus le carré de la distance des deux axes.

Cette formule est d'un usage fréquent en pratique, où il arrive souvent que l'on a à déterminer le rayon de gyration par rapport à un axe, pour un corps dont on connaît le rayon de gyration par rapport à un axe parallèle passant par le centre de gravité.

114. *Marteaux. Perte de puissance vive due au choc des cames.* Considérant une bague à cames comme étant un cylindre plein, le carré de son rayon de gyration est (100 et 104)

$$\frac{1}{2}\rho^2,$$

et son moment d'inertie, en appelant M la masse de la bague,

$$\frac{1}{2}M\rho^2.$$

Appelant M′ la masse qui, concentrée au point d'impact, c'est-à-dire au point de la came qui frappe le marteau, a le même moment d'inertie

que la bague tournant autour de son axe, et R la distance de ce point d'impact à l'axe de rotation, on a

$$M'R^2 = \frac{1}{2}M\rho^2, \quad \text{d'où} \quad M' = \frac{1}{2}M\frac{\rho^2}{R^2}.$$

Il faut calculer de même la masse M'', qui, appliquée au point d'impact, a le même moment d'inertie que l'arbre de la bague, et posant $m = M' + M''$, m représente la masse choquante à faire intervenir dans la formule du n° 97.

En opérant d'une manière analogue, et en ayant égard à la forme et à la nature des différentes parties du marteau et de son manche, on détermine la masse choquée m', qui, appliquée au point d'impact, a, par rapport à l'axe de la *hurasse*, le même moment d'inertie que le marteau avec son manche.

Ayant m et m', la formule du n° 97 donne la perte de puissance vive pour chaque soulèvement du marteau, en remarquant que la vitesse de la masse choquée est nulle, et que la vitesse moyenne de la masse choquante est, n étant le nombre de tours de la bague par minute,

$$v = \frac{2\pi Rn}{60}.$$

115. *Équilibre dynamique des marteaux.* Soit un *marteau frontal* (*fig.* 15). On remplace le poids du marteau et de son manche par un poids, lequel, étant appliqué au point d'impact, a, par rapport à l'axe de la hurasse, le même moment que le poids du marteau et de son manche; on en fait autant pour le frottement des tourillons de la hurasse, pour celui des tourillons de l'arbre à cames et pour celui qui s'exerce entre les cames et le marteau; et le travail absorbé pour élever tous ces poids fictifs, augmenté de la perte de puissance vive due au choc, étant égal au travail que doit produire la puissance, l'équilibre dynamique donne, pour une minute,

Fig. 15.

$$n \times 2\pi RP = nn'h\left(\frac{Ql}{l'} + \frac{fpr}{l'} + \frac{fqr'}{R} + Q'\frac{fh}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}\right) + \frac{nn'}{2} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}.$$

n nombre de tours de la bague en une minute;
n' nombre des cames montées sur la bague;
P puissance agissant sur l'arbre à cames à l'extrémité d'un bras de levier éga à la distance du point d'impact à l'axe de l'arbre à cames;
R bras de levier de la puissance P;
h levée du marteau au point d'impact;
Q poids du marteau et de son manche;
l distance du centre de gravité du marteau et de son manche à l'axe de rotation de la hurasse;

l' distance du point d'impact à l'axe de rotation de la hurasse;
$f' = 0,15$ coefficient de frottement des tourillons de la hurasse, et de ceux de l'arbre à cames;
$p = Q\frac{l'-l}{l'}$ poids reposant sur les tourillons de la hurasse; c'est la partie du poids du marteau et de son manche supportée par ces tourillons (*Int.*, 1023);
r rayon des tourillons de la hurasse;
q pression des tourillons de l'arbre à cames sur leurs coussinets;
r' rayon des tourillons de l'arbre à cames;
$f = 0,25$ coefficient de frottement des cames sous la tête du marteau;
$Q' = \frac{Ql}{l'}$ pression qui s'exerce entre les cames et la tête du marteau, en ne tenant compte que de la pression due au poids du marteau et en négligeant celle qui provient du frottement des tourillons de la hurasse;
m masse choquante transportée au point d'impact, calculée comme il est indiqué n° 114;
m' masse choquée transportée au point d'impact, calculée comme la masse choquante;
$v = \frac{2\pi Rn}{60}$ vitesse moyenne des cames au point d'impact (114);
$n \times 2\pi RP$ travail moteur dépensé par minute;
$Q\frac{l}{l'}$ poids du marteau et de son manche, transporté au point d'impact;
$f'p\frac{r}{l'}$ poids qui, appliqué au point d'impact, produit le même effet que le frottement des tourillons de la hurasse;
$Q'\frac{fh}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}$ frottement des cames sous la tête du marteau; il est analogue à celui des engrenages (80);
$\frac{nn'}{2} \times \frac{mm'v'^2}{m+m'}$ perte de puissance vive due aux chocs des cames sous le marteau (114).

De la formule précédente on tire

$$P = \frac{n'h}{2\pi R}\left(\frac{Ql}{l'} + \frac{f'pr}{l'} + \frac{f'qr'}{R} + fQ'\,\frac{h}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}\right) + \frac{n'}{5\pi R} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}.$$

Pour un autre genre quelconque de marteau on déterminerait la valeur de P en opérant d'une manière analogue.

Les marteaux à bascules, dits martinets, employés à l'étirage et au platinage des petits fers, au raffinage des aciers et à la fabrication de divers outils, frappent de 200 à 400 coups par minute, et leur poids, qui diminue à mesure que le nombre de coups frappé augmente, varie, non compris le poids du manche qui est en bois, de 80 à 40 kilog. La longueur totale du manche, comptée depuis l'axe de la tête du marteau, varie de 2^m,50 a 3^m,00; le point de rotation est ordinairement aux 2/3 de cette longueur à partir de l'axe de la tête du marteau; cependant il est aux 3/4 et quelquefois plus, quand le marteau doit frapper un grand nombre de coups. Le nombre des cames montées sur la bague varie ordinairement de 14 à 16. Pour une grande vitesse, la levée du

marteau varie de $0^m,25$ à $0^m,27$; pour une petite vitesse, elle varie de $0^m,30$ à $0^m,35$; et pour une vitesse moyenne, elle est comprise entre $0^m,30$ et $0^m,40$.

Les marteaux à soulèvement, employés particulièrement à l'affinage du fer par la méthode allemande, frappent de 70 à 200 coups à la minute, et leur poids, non compris le manche, qui est en bois, varie de 300 à 400 kilog. La longueur du manche, comptée depuis l'axe de la tête du marteau jusqu'au point de rotation de la *bogue*, varie de $2^m,10$ à $2^m,60$, et la distance de cet axe au point frappé par les cames, de $0^m,40$ à $0^m,55$. Il y a ordinairement cinq cames montées sur la bague. La levée du marteau est de $0^m,55$ environ.

Enfin *les marteaux frontaux*, mis en usage dans les forges où l'on fabrique le fer par la méthode anglaise, frappent de 60 à 100 coups par minute, et pèsent, y compris le manche, qui est tout en fonte, de 2500 à 4000 kilog., et même quelquefois plus. La longueur du manche, depuis le point d'impact jusqu'à l'axe de rotation, varie de $2^m,30$ à $2^m,80$. Le nombre des cames est ordinairement égal à 5. La levée du marteau varie de $0^m,35$ à $0^m,40$.

En pratique, d'après M. Poucelet, le rapport de la masse fictive choquante m à la masse fictive choquée m' est rarement inférieure à 10 (114). Pour les martinets et marteaux à soulèvement employés à la fabrication du fer, ce rapport n'est pas inférieur à 12, et pour les marteaux frontaux il est au moins 30.

116. *Marteau-pilon.* Depuis quelques années, dans plusieurs usines à fer, et surtout dans les grands ateliers de construction, on fait usage du *marteau-pilon* mû directement par la vapeur. Ces marteaux ont été établis dans des proportions très-diverses : ainsi il y en a qui pèsent 100 kilog. seulement, et d'autres 4000 kilog.; ceux de 100 à 1000 kilog. donnent de 80 à 100 coups par minute, et ceux de 2000 à 4000 kilog. en donnent de 60 à 70.

On a établi des marteaux-pilons du poids de 3500 à 4000 kilog. dont les chutes atteignent 2 mètres à $2^m,50$.

Un avantage capital de ces marteaux, c'est qu'on peut faire varier leur chute et leur vitesse avec la plus grande facilité selon les dimensions et l'état de dureté de la pièce que l'on forge.

Dimensions d'un marteau-pilon établi par M. Nillus du Havre, d'après le système Nasmyth, pour les ateliers de la marine à Brest :

Poids total des deux bâtis	14.000 kil.
id. de la plaque de fondation	8.000
id. du cylindre	3.500
id. du marteau	3.500
id. des accessoires en fer	1.200
id. *id.* en fonte et cuivre	400
Total	30.600

L'enclume ayant été fabriquée à Brest, son poids n'est pas compris dans ce total.

Pression habituelle de la vapeur	. . . . . .	5 atmosphères.
Diamètre du cylindre	. . . .	$0^m,60$
Course du piston ou levée du marteau	. .	$2^m,00$
Diamètre de la tige	. . . .	$0^m,10$

117. *Volants pour marteaux.* Le travail produit par la force P (115), pendant la durée totale d'un coup de marteau, étant absorbé pendant l'instant que met la came à soulever le marteau, il faut que le volant, ou l'attirail (roue et arbre à cames) qui le remplace le plus souvent, accumule, depuis l'instant où une came quitte le marteau jusqu'à l'instant où la came suivante le reprend, une quantité de puissance vive égale à l'excès du travail A produit par la force P pendant la durée totale d'un coup, sur le travail A′ que produit cette force pendant le temps d'action de la came.

Le travail produit par P étant régulier, on aura A et A′ quand on connaîtra les temps pendant lesquels ces quantités de travail sont produites. On connaît A, puisqu'on a le nombre des coups de marteau frappés dans un temps donné, et par suite la durée d'un coup. Comme la vitesse de rotation de la bague est à peu près régulière, à l'aide d'une épure représentant la position des cames sous le manche du marteau, on aura l'arc décrit par la bague pendant l'action de la came, et par suite la durée de cette action, ce qui permettra de déterminer A′. Cette épure servira aussi à déterminer l'écartement à donner aux cames, écartement qui doit être tel, que, pendant l'instant d'inaction de deux cames successives, le marteau ait le temps de réagir sur le rabat et de redescendre sur l'enclume; sans quoi le marteau *camerait*, c'est-à-dire retomberait sur la came qui arrive pour le soulever, avant d'avoir produit son effet sur le fer. D'après M. Faure, il résulterait de quelques observations faites par M. Walter de Saint-Ange sur des marteaux et martinets établis, que, pour les marteaux à soulèvement, le temps nécessaire à la réaction sous le rabat et à la descente varie de $1,04t$ à $1,15t$, et que, pour les martinets, il varie de $0,45t$ à $0,88t$, suivant que le nombre des coups frappés est respectivement plus grand ou plus petit.

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \qquad (18)$$

t durée de la descente libre du centre de gravité de l'ensemble du marteau et du manche;

h levée de ce centre de gravité; h correspond au point où la came quitte le manche du marteau, point auquel doit commencer l'action du rabat.

Les marteaux frontaux marchant lentement, ils ne s'élèvent pas au delà du point où les cames les quittent; de sorte que, sauf le retard causé

à la descente par la réaction du marteau sur le fer et par les frottements des tourillons de la hurasse, la durée d'inaction des cames peut être égale à $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$; mais, d'après les observations de M. Walter de Saint-Ange, en pratique, on fait varier cette durée, comme pour les marteaux à soulèvement, de $1,04$ à $1,15t$.

Q étant le poids du volant, V sa vitesse au moment où la came quitte le marteau, et V' sa vitesse au moment où la came suivante commence son action, on doit avoir (30)

$$\frac{Q}{2g}(V'^2 - V^2) = A - A'.$$

Comme on ne connaît pas les valeurs de V' et V, on établit entre elles et la valeur de la vitesse moyenne $v = \frac{2\pi r n}{60}$ (114) une relation dont il ne convient pas de s'écarter en pratique; ainsi on pose

$$V' - V = \frac{v}{K},$$

et comme on peut supposer que l'on a

$$V' + V = 2v,$$

multipliant ces deux équations membre à membre, il vient

$$V'^2 - V^2 = \frac{2v^2}{K},$$

et par suite

$$\frac{Q}{2g} \times \frac{2v^2}{K} = \frac{Qv^2}{gK} = A - A',$$

K coefficient de régularité de vitesse, que, dans ce cas, l'on fait égal à 20; la grande régularité n'étant pas de rigueur (91).

C'est par des considérations analogues qu'on a établi les formules des nos 91 et 92, et que l'on déterminerait le poids d'un volant dans un cas quelconque; quand toutefois on connaît les durées des actions et de leurs intervalles, et que l'on peut apprécier le travail absorbé pour chaque action : ainsi pour les laminoirs par exemple, ces données ne pouvant être posées d'une manière analytique, on ne peut donner qu'une formule empirique pour calculer le poids de leurs volants (118).

M. Morin donne la formule suivante pour calculer le poids des volants pour marteaux :

$$P = \frac{K}{R^2}.$$

P poids de la jante du volant en kilogrammes;
R rayon moyen de la jante du volant;
K coefficient. Pour les marteaux frontaux, $K = 20000$ ou 30000, selon que le poids des marteaux varie de 3000 à 3500 kilogrammes, ou de 4000 à 4900 kilogrammes. Pour les marteaux à l'allemande conduits par un engrenage, dont le poids total, y compris le manche, la hurasse et les ferrures, varie ordinairement de 600 à 800 kilogrammes, et qui battent de 100 à 110 coups en une minute, le volant étant monté sur l'arbre à cames, $K = 15000$. Pour les martinets à engrenages, qui battent ordinairement de 150 à 200 coups à la minute, $K = 6000$ ou 9000, selon que le poids du martinet, y compris le manche et les ferrures, est 360 ou 500 kilogrammes.

118. *Les poids des volants de laminoirs pour les grandes tôles et pour l'étirage des fers en barres peut se calculer*, d'après M. Morin, par la formule

$$P = \frac{130000\,NK}{mv^2}.$$

P poids de la jante du volant en kilogrammes;
N force en chevaux transmise par le moteur à l'arbre du volant;
v vitesse moyenne de la jante du volant;
m nombre de tours des cylindres en 1';
K coefficient numérique qui est égal : 1° à 20 pour les machines de 80 à 100 chevaux faisant marcher à la fois 6 à 8 équipages de cylindres à tôle ou à fer en barres; 2° à 25 pour les machines de 60 chevaux faisant marcher 4 à 6 équipages pour l'étirage des fers; 3° à 80 pour les machines de 30 à 40 chevaux ne faisant marcher à la fois qu'un seul équipage de cylindres à grosses tôles, ou deux équipages de cylindres ébaucheurs et finisseurs pour les petits fers.

Les valeurs données pour K s'appliquent aux laminoirs conduits par des machines à vapeur, des roues à augets et des roues de côté; mais pour les roues à aubes courbes ou à aubes planes recevant l'eau en dessous, la vitesse étant très-grande, on diminue un peu les valeurs précédentes de K.

119. *Forces centripète et centrifuge* (*Int.*, 1219). Lorsqu'un mobile suit une circonférence ou seulement un arc de cercle, c'est qu'il est sollicité en chaque point de son mouvement par deux forces, l'une tangentielle à l'arc suivi, et l'autre dirigée vers le centre de cet arc.

La direction de cette dernière force lui a fait donner le nom de *force centripète*.

La réaction égale et contraire à la force centripète, et qui fait que le mobile s'écarte suivant le rayon quand tout à coup la force centripète est supprimée, prend le nom de *force centrifuge*. La fronde rend bien compte de cet effet.

Les forces centripète en centrifuge ont pour expression commune, abstraction faite du signe,

$$C = \frac{mv^2}{r} = \frac{Pv^2}{gr}.$$

C forces centripète et centrifuge;
m masse du corps en mouvement;
v vitesse du centre de gravité du corps;
r rayon de la circonférence décrite par le centre de gravité du corps.
$P = mg$ poids du mobile (22).

120. *Pendule simple* (*Int.*, 1229). La durée d'une oscillation complète du pendule simple est, lorsque l'amplitude est très-petite,

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

T durée de l'oscillation;
l longueur du pendule;
g accélération de vitesse due à la pesanteur (17), dans le lieu où oscille le pendule.

Cette expression de la durée d'une très-petite oscillation du pendule simple fait voir que, pour un même pendule ou pour des pendules de même longueur, les oscillations sont *isochrones*, c'est-à-dire de même durée, partout où la valeur de g est la même.

Pour un pendule d'une longueur l', oscillant dans un lieu où $g = g'$, on aurait

$$T' = \pi\sqrt{\frac{l'}{g'}};$$

donc $$T : T' :: \sqrt{\frac{l}{g}} : \sqrt{\frac{l'}{g'}}.$$

Lorsque $g = g'$, cette proportion devient

$$T : T' :: \sqrt{l} : \sqrt{l'},$$

et pour $l = l'$,

$$T : T' :: \sqrt{\frac{1}{g}} : \sqrt{\frac{1}{g'}} :: \sqrt{g'} : \sqrt{g},$$

proportions faciles à traduire verbalement.

Application. Quelle est la longueur du pendule simple qui bat les secondes à Paris?

De la formule $T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, on tire $l = \frac{gT^2}{\pi^2}$.

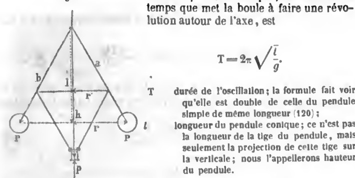
Remplaçant π, g et T par leurs valeurs, on a

$$l = \frac{9{,}8088 \times 1 \times 1}{3{,}14159 \times 3{,}14159} = 0^m{,}99384.$$

On trouverait de même la longueur du pendule dont la très-petite oscillation doit avoir une durée quelconque.

121. *Pendule conique.* (*Fig.* 16) (*Int.*, 1227). La durée d'une oscillation du pendule conique, c'est-à-dire le temps que met la boule à faire une révolution autour de l'axe, est

Fig. 16.



$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

T durée de l'oscillation; la formule fait voir qu'elle est double de celle du pendule simple de même longueur (120);

l longueur du pendule conique; ce n'est pas la longueur de la tige du pendule, mais seulement la projection de cette tige sur la verticale; nous l'appellerons hauteur du pendule.

L'isochronisme des oscillations a lieu dans les mêmes circonstances que pour le pendule simple, et les proportions posées n° 120 se reproduisent également pour le pendule conique.

Ce qui vient d'être dit s'applique au cas où le pendule a plusieurs boules, comme à celui où il n'en a qu'une.

Suivant que T augmente ou diminue, la hauteur l augmente ou diminue, et on conçoit que l'on peut utiliser l'oscillation qu'en subit le manchon inférieur, pour faire mouvoir l'organe qui introduit la vapeur dans le cylindre d'une machine à vapeur, ou l'eau sur une roue hydraulique, et, par suite, régler l'arrivée de ces matières motrices de manière à obtenir une vitesse que l'on peut considérer comme constante dans la pratique.

Le poids de chacune des boules d'un pendule conique est donné par la formule :

$$P = \frac{pa(bh + al)(n-1)^2}{(2n-1)2b^2h}.$$

P poids d'une boule;

p force qu'il faut appliquer au manchon inférieur, au repos et avant que les boules soient en place, pour le soulever ainsi que les tiges quand il est dans la position qui correspond à la vitesse de régime, pour laquelle on a $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. On détermine p au moyen d'une balance, ou d'un fil très-flexible passant sur une petite poulie très-mobile. p comprend aussi l'effort à produire sur le manchon pour manœuvrer la soupape régulatrice;

a distance du point d'oscillation supérieur au point où les tiges supérieures s'articulent avec les tiges inférieures, mesurée sur les tiges mêmes;

b longueur totale de chacune des tiges supérieures;
h projection de chacune des tiges inférieures sur la verticale;
l hauteur du pendule ou projection de b sur la verticale;
n coefficient de latitude de durée d'oscillation, avant que le pendule modère la vitesse de la machine.

La durée d'oscillation correspondant à la vitesse de régime de la machine étant

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \text{d'où} \quad l = \frac{gT^2}{4\pi^2},$$

la formule précédente donne le poids de chaque boule pour que le pendule agisse sur la soupape régulatrice dès que la durée d'oscillation est

$$T' = T\frac{n-1}{n},$$

ce qui donne

$$l' = \frac{gT^2\dfrac{(n-1)^2}{n^2}}{4\pi^2}.$$

La valeur de n dépend de la nature du travail à produire; elle est ordinairement comprise entre 10 et 20.

A l'aide d'une épure, on détermine la quantité dont s'élève le manchon pour la différence $l - l'$ des hauteurs du pendule.

On obtient la vitesse correspondant à T au moyen d'une poulie fixée au pendule, à laquelle on transmet le mouvement à l'aide d'une corde ou d'une courroie sans fin qui communique avec l'arbre de la machine.

Quand les tiges du pendule forment entre elles un parallélogramme, disposition qu'il convient d'adopter quand rien ne s'y oppose, on a $bh = al$, et la formule qui donne le poids d'une boule devient

$$P = \frac{pa(n-1)^2}{(2n-1)b}.$$

Dans l'établissement de ces formules qui donnent la valeur de P, on a négligé l'effet de la force centrifuge sur les tiges; les résultats obtenus sont donc un peu faibles.

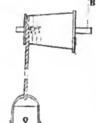
Dans la pratique, on fait les boules creuses, et on y introduit peu à peu de la grenaille de plomb, que l'on fait fondre quand le poids de la boule est tel, que la soupape régulatrice fonctionne dès qu'on a

$$T' = T\frac{n-1}{n}.$$

Ordinairement le poids des boules est compris entre 15 et 35 kilog.

122. *Treuil régulateur*. Le rayon à donner au treuil (*fig.* 17), au point correspondant à la position d'une spire quelconque de la corde qui s'enroule, pour que l'effort à produire pour manœuvrer le treuil reste constant, malgré la plus ou moins grande longueur de corde déroulée, est donné par la formule

Fig. 17.



$$r+e=\frac{PB}{Q+pl}.$$

- r rayon cherché;
- e rayon de la corde;
- P force motrice;
- B bras de levier de la force motrice;
- Q poids élevé;
- p poids du mètre de longueur de corde;
- l longueur de corde déroulée.

La corde venant toujours se placer à côté d'elle-même à mesure qu'elle s'enroule, dès qu'on a son diamètre, on connaît à très-peu près la position des différentes spires suivant la longueur de l'axe du treuil, en portant successivement le diamètre de la corde sur cet axe.

La longueur de corde déroulée après un nombre quelconque n de révolutions du treuil est

$$l_n = L - 2\pi[ne + (r_1 + r_2 + r_3 + \dots\dots + r_n)].$$

- l_n longueur de corde déroulée;
- L longueur totale de la corde;
- n nombre des spires qui se trouvent sur le treuil;
- r_1, r_2, r_3... r_n rayons du treuil correspondant à la 1re, 2e, 3e... ne spire.

Comme théoriquement le treuil régulateur différerait très-peu d'un tronc de cône, en pratique on se contente de cette forme, dont le petit et le grand rayons se tirent des formules :

$$r+e=\frac{PB}{Q+pL},\quad R+e=\frac{PB}{Q}.$$

- r petit rayon du treuil;
- R grand rayon du treuil.

Pour l'exploitation des mines, on fait usage du treuil régulateur, et, afin de ne pas perdre de temps pendant sa manœuvre, on emploie deux cordes, dont une s'enroule et monte la charge pendant que l'autre se déroule et descend à vide. Cette disposition exige l'emploi de deux treuils semblables à celui (*fig.* 17), montés sur le même axe, accolés par leurs grandes bases, et dont les rayons sont calculés d'après les considérations suivantes :

1° Quand un fardeau est en bas, sa corde est complétement déroulée, tandis que l'autre est complétement enroulée et non chargée; on a donc

$$PB = (Q + pL)(r + e),$$

d'où on tire

$$r + e = \frac{PB}{Q + pL}.$$

2° Pour le fardeau qui arrive en haut, la corde est complétement enroulée, tandis que l'autre est entièrement déroulée; on a donc

$$PB = Q(R + e) - pL(r + e),$$

d'où on tire, en remplaçant $r + e$ par sa valeur (1°),

$$R + e = \frac{PB}{Q} + \frac{pLPB}{Q(Q + pL)} = \frac{PB}{Q}\left(1 + \frac{pL}{Q + pL}\right).$$

r petit rayon de chaque treuil;
R grand rayon de chaque treuil.

On fait encore usage d'un autre genre de treuil appelé *bobine*, dans lequel la corde, qui est plate, ou la courroie s'enroule sur elle-même, de manière qu'après chaque tour son épaisseur s'ajoute au rayon de la bobine, c'est-à-dire au bras de levier de la résistance. Comme il est impossible de bien régulariser cette machine, nous nous contenterons de la citer.

123. *Sonnette à tiraudes.* Le tableau (36) fait voir que l'effet maximum fourni par l'homme employé dans les circonstances de cette machine correspond à un effort de 18k., à une vitesse moyenne de 0m,20 par seconde, et à une durée de travail journalière de 6 heures. Dans les chantiers de construction, la durée du travail est de 9 à 10 heures par jour; mais comme le 1/3 à peu près de ce temps est employé à disposer les appareils, on peut considérer 6 heures comme étant la durée du travail effectif journalier.

La manœuvre de la sonnette à tiraudes étant très-fatigante, on ne bat de suite que 20 à 25 coups de mouton; comme il faut 1' 20" pour cela, qu'ensuite on se repose pendant le même temps, et que le temps perdu est de 20" environ, chaque volée exige 3 minutes.

A la construction du pont d'Iéna, on travaillait 10 heures par jour, la levée du mouton était de 1m,45, on donnait moyennement 12 volées de chacune 30 coups à l'heure, le mouton pesait 587k., et il était manœuvré par 38 hommes. De ces données, il résulte que l'effort produit par chaque homme était seulement de 15k,45, avec une vitesse moyenne de 0m,145 par seconde; mais cela, en négligeant les frottements de l'axe de la poulie, la roideur de la corde et l'effet de l'obliquité des divers cordons tirés par un aussi grand nombre d'hommes; de plus,

la levée $1^m,45$ étant un peu forte, l'effet produit par les hommes devait être diminué ; il convient que la levée du mouton soit comprise entre $1^m,30$ et $1^m,40$.

Un mouton à enfoncer les pilotis doit peser au moins 300^k, et sa levée ne doit pas être inférieure à $1^m,10$ ou $1^m,30$; il est manœuvré par 18 à 20 hommes. Les moutons du poids de 600^k sont manœuvrés par 35 à 40 hommes.

124. *Sonnette à déclic.* Pour la sonnette à déclic, la puissance est donnée par la formule

$$P=(Q+q+q')\frac{r'''\,r'}{r''\,r}.$$

- P puissance agissant sur la manivelle;
- r rayon de la manivelle;
- r' rayon du pignon monté sur l'arbre de la manivelle;
- r'' rayon de la roue d'engrenage montée sur l'arbre du treuil, et avec laquelle s'engrène le pignon de rayon r';
- r''' rayon du treuil;
- Q poids du mouton;
- q résistance due à la roideur de la corde sur la poulie (65);
- q' résistance due à la roideur de la corde sur le treuil.

On a dans cette formule négligé le frottement des axes et des engrenages, dont on tiendrait facilement compte (63 et 80).

Ce genre de sonnette est surtout avantageux quand il s'agit de manœuvrer de lourds moutons, ceux de 400 à 600 kilog. Toutes choses égales d'ailleurs, le prix de revient du battage des pieux n'est que les 0,65 à 0.70 de celui du battage avec la sonnette à tiraudes.

125. *Battage des pieux.* L'expérience prouve que l'enfoncement des pieux est proportionnel au produit de la masse du mouton plus la masse du pieu, par le carré de la vitesse commune de ces deux masses après le choc, c'est-à-dire à

$$(m+m')\,u^2=(m+m')\frac{m^2v^2}{(m+m')^2}=\frac{m^2v^2}{m+m'}. \qquad (96)$$

Ayant $v^2=2gh$ (18), l'enfoncement est donc proportionnel à

$$\frac{2gm^2h}{m+m'}=\frac{2gmh}{1+\frac{m'}{m}}.$$

- u vitesse commune au mouton et au pieu après le choc;
- v vitesse du mouton avant le choc;
- m masse du mouton;
- m' masse du pieu;
- h levée du mouton.

L'expression $\frac{2gm^2h}{m+m'}$ fait voir que, pour une même masse de mouton, l'enfoncement d'un même pieu est proportionnel à la levée du mouton, et l'expression $\frac{2gmh}{1+\frac{m'}{m}}$ montre que, pour un même produit mh, l'effet est d'autant plus grand que la masse m est plus grande, et que par conséquent, pour l'économie du travail, qui est représenté par mh, il faudra prendre de gros moutons qu'on élèvera à une hauteur modérée de $2^m,50$ à 3 ou 4 mètres. Pour les derniers coups frappés sur un pieu, on peut porter la hauteur h à 5 ou 6 mètres.

On considère un pieu comme battu au refus absolu quand il ne s'enfonce plus que de $0^m,004$ à $0^m,005$ par volée de 30 coups, ou par coup d'un mouton de sonnette à déclic tombant d'une hauteur de 4 à 5 mètres. Au pont de Neuilly, où les pieux avaient à supporter jusqu'à 52 000 kilog. pour un diamètre de $0^m,325$, on cessait le battage quand l'enfoncement n'était plus que de $0^m,0045$ par volée de 25 coups d'un mouton tombant de $1^m,40$.

Lorsque le poids à supporter par les pieux n'est pas considérable, on n'a pas besoin d'arriver à un refus aussi absolu; on peut, quand un pieu ne porte que 7 à 8 000 kilog., arrêter le battage quand l'enfoncement n'est plus que de $0^m,03$ à $0^m,04$ ou $0^m,05$ par volée, si toutefois on est sûr que les pieux ont pénétré dans un sol résistant.

126. *Manége.* En supposant que dans un manége une résistance agisse tangentiellement à un tambour horizontal, comme cela a lieu généralement, et que sur l'arbre de ce tambour soit monté un pignon conique qui engrène avec une roue conique montée sur l'arbre vertical du manége, le travail dépensé par la puissance appliquée à l'extrémité des flèches est égal au travail absorbé par la résistance tangentielle au tambour, par le frottement des tourillons de ce tambour, par celui des engrenages et par celui des tourillons de l'arbre vertical, et, pour une révolution du manége, l'équilibre dynamique donne

$$P \times 2\pi R = Q'f \times 2\pi r + Q''f \times \frac{2}{3}\pi r +$$
$$\frac{R'}{R''}\left[Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''' + (Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''')\, f'\pi\left(\frac{1}{n}+\frac{1}{n'}\right)\right].$$

P puissance agissant à l'extrémité des flèches.
R bras de levier de la puissance, ou longueur des flèches;
Q' somme moyenne des pressions sur les tourillons de l'arbre vertical; on calculera la pression sur chaque tourillon en opérant comme pour le treuil (78); mais comme cette pression varie pour chaque position de la puissance, on prendra une moyenne entre sa plus grande et sa plus petite valeur;
r rayon des tourillons de l'arbre vertical;

f coefficient de frottement, que l'on suppose commun à tous les tourillons ainsi qu'à la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre vertical;
Q'' pression de la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre vertical sur la crapaudine;
R' rayon de la roue conique montée sur l'arbre du manége;
R'' rayon du pignon conique monté sur l'axe du tambour;
R''' rayon du tambour plus celui de la corde;
Q somme des pressions des deux tourillons de l'arbre du tambour sur leurs coussinets (78);
r' rayon des tourillons de l'arbre du tambour;
F résistance agissant tangentiellement au tambour; elle se compose du poids élevé, du poids de la corde et de la roideur de cette corde;
f' coefficient de frottement des engrenages;
n nombre de dents du pignon;
n' nombre de dents de la roue;
$P \times 2\pi R$ travail dépensé par la puissance;
$Q'f \times 2\pi r$ travail absorbé par le frottement latéral des pivots de l'arbre du manége;
$Q''f \times \frac{2}{3}\pi r$ travail absorbé par le frottement de la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre du manége;
$\frac{R'}{R''} Qf \times 2\pi r'$ travail absorbé par le frottement des tourillons de l'arbre du tambour;
$\frac{R'}{R''} F \times 2\pi R'''$ travail absorbé par la résistance F agissant tangentiellement au tambour;
$\frac{R'}{R''}(Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''')f'\pi\left(\frac{1}{n}+\frac{1}{n'}\right)$ travail absorbé par le frottement des engrenages (80).

En négligeant tous les frottements, ainsi que le poids et la roideur de la corde, l'équilibre dynamique serait, pour une révolution du manége,

$$P \times 2\pi R = \frac{R'}{R''} F' \times 2\pi R''',$$

d'où l'on tire

$$P = F' \frac{R'R'''}{RR''}.$$

F' poids élevé par la corde qui s'enroule sur le tambour.

Le rayon d'un manége ne doit pas être inférieur à 2m,50, et il convient de lui donner de 3 à 4 mètres.

127. *Chevaux de manége, soins à leur donner.* Les chevaux courts et trapus conviennent pour le manége. Leur taille, mesurée sur le garrot, peut varier de 1m,45 à 1m,55.

Un cheval moyen peut produire une traction de 360 kilog. quand il ne prend aucune vitesse; mais quand il marche, la traction qu'il peut produire n'est que le 1/4 environ de cette quantité; on compte sur 80 à

90 kilog. au maximum pour une vitesse moyenne de 1 mèt. par seconde, et pour un temps qui n'est pas trop prolongé. Le plus souvent, les chevaux employés au manége étant fatigués et presque usés, ils ne produisent qu'une traction de 40 à 50 kilog. avec une vitesse de 0m,90 à 1m,00 par seconde (36 à 38).

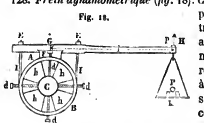
Le travail ne doit pas avoir une durée de plus de 3 heures, et il doit être suivi d'un repos d'une durée au moins égale. Dans un travail continu, le repos doit être de 4 heures pour 2 heures de travail, ce qui fait 8 heures de travail effectif par jour.

Les heures de repos et de pansage des chevaux doivent être régulières. Leur nourriture doit être peu échauffante; aussi ne leur donne-t-on que peu d'avoine. Ils mangent ordinairement, en 24 heures, 10 kilog. de foin et 4 à 5 kilog. de son; mais il serait plus convenable de leur donner 5 kilog. de foin, 5 kilog. de paille et 8 litres d'avoine. Le foin doit être vert, d'une odeur agréable, légèrement aromatique et d'une saveur douce et sucrée, fin, sec et assez flexible; on doit préférer le foin de plaine ou de terrains légèrement inclinés à celui de marais, qui est malsain; il doit, autant que possible, être consommé de 2 mois à 2 ans de récolte. La paille de froment non barbu est la meilleure comme nourriture; elle doit être nouvelle et de couleur jaune doré. L'avoine doit être pesante, lisse, sans mauvaise odeur, bien nettoyée; sa couleur est indifférente; elle doit peser au moins 42 kilog. l'hectolitre si elle est nouvelle, et 40 kilog. si elle est déjà vieille; elle ne doit être donnée aux chevaux qu'après 4 à 5 mois de récolte.

L'eau doit être donnée aux chevaux à la température de l'atmosphère; celle de pluie ou de rivière est la meilleure; on doit rejeter celle qui est croupie et celle qui ne dissout pas le savon.

128. *Frein dynamométrique* (*fig.* 18). Cet appareil sert à déterminer la puissance d'une machine, ou le travail absorbé par les différents appareils que commande l'arbre moteur de cette machine, en le remplaçant par le travail, facile à évaluer, absorbé par un simple frottement produit sur cet arbre.

Fig. 18.



AB bague en fonte, que l'on centre sur l'arbre moteur C au moyen des vis *d*, *d*, .;

h, *h*,.. cales fixant la bague AB sur l'arbre C;

E, E écrous servant à serrer la bague AB entre le coussinet F fixé au levier GH, et le lien en fer II;

K plateau de balance fixé à l'extrémité du levier GH.

Supposons qu'après avoir assujetti le levier GH dans une position

horizontale, on serre la bague AB entre le coussinet F et le lien H; la vitesse de rotation de l'arbre C ira en diminuant à mesure que le serrage augmentera, et finira par atteindre la vitesse de régime; alors, le travail absorbé par le frottement de la bague AB sera égal au travail absorbé par les différents appareils que commandait l'arbre C. Si maintenant on rend libre le levier GH, il sera entraîné par le frottement de la bague AB, et tournera avec l'arbre C; mais si on place dans le plateau K un poids P, tel que le levier GH ne soit plus entraîné et ne fasse qu'osciller légèrement de dessus en dessous de la position horizontale, le travail absorbé par le frottement de la bague AB sera encore égal au travail absorbé par la force $P + p$ agissant à l'extrémité du levier l, et on aura, pour une révolution de l'arbre C,

$$\mathcal{T}_u = F \times 2\pi r = (P + p)\, 2\pi l.$$

$\mathcal{T}_u$ travail transmis par l'arbre moteur C, ou travail absorbé par les différents appareils que commande cet arbre ;
F frottement de la bague AB contre le coussinet F et le lien H;
P poids placé dans le plateau K ;
p force verticale qu'il faut appliquer au point H pour maintenir le levier GH dans une position horizontale quand il repose en G sur un couteau ordinaire de balancier; on détermine p au moyen d'une balance ou d'un fil flexible passant sur une poulie très-mobile.

Tout est connu dans l'expression $(P + p)2\pi l$, on connaît donc $\mathcal{T}_u$.

Application. Soit $p = 30$ kil., $P = 100$ kil. et $l = 2^m,50$; il s'agit de déterminer le travail transmis par l'arbre moteur en chevaux-vapeur, sachant que cet arbre fait 40 révolutions par minute.

On a, pour une révolution, en remplaçant les lettres par leurs valeurs,

$$\mathcal{T}_u = (100 + 30) \times 2 \times 3{,}14 \times 2{,}50 = 2041 \text{ kilogrammètres},$$

et pour une seconde,

$$\mathcal{T}_u = 2041 \, \frac{40}{60} = 1360^{km},66.$$

La force de la machine est donc de

$$\frac{1360{,}66}{75} = 18{,}14 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Quand on n'a pas de bague à sa disposition, et que l'arbre moteur est cylindrique, on peut produire le frottement directement sur l'arbre si son diamètre est suffisant. On remplace quelquefois le lien en fer H par un morceau de bois, que l'on creuse un peu afin qu'il frotte par une plus grande surface.

Les surfaces frottantes doivent avoir une certaine étendue, afin que

la pression n'atteigne pas la limite qui pourrait les altérer. Pour une force de 6 à 8 chevaux, il convient que l'arbre ou la bague, faisant 20 à 30 tours par minute, ait 0m,16 de diamètre; pour une force de 15 à 25 chevaux, il convient que, pour 15 à 30 tours, ce diamètre varie de 0m,30 à 0m,40, et pour une force de 40 à 70 chevaux, ce diamètre doit varier de 0m,65 à 0m,80 pour une vitesse de 15 à 30 tours par minute.

L'arbre ou la bague doit être parfaitement cylindrique, et on doit avoir soin de roder pendant quelque temps les surfaces frottantes l'une sur l'autre; sans cela le frein n'avancerait sur l'arbre que par secousses, et il ne donnerait que des résultats incertains.

Nous avons eu occasion de faire usage du frein de Prony dans un cas où l'arbre faisait 120 tours par minute. Le frein a fonctionné avec une très-grande régularité; ses oscillations étaient presque insensibles; mais au moindre arrêt de l'arbre, l'adhésion du frein sur la bague devenait telle, que l'on était obligé de desserrer le frein pour permettre le mouvement. Un filet abondant d'eau de savon noir rafraîchissait et lubrifiait les parties frottantes. La puissance mesurée par le frein était de 2 chevaux et demi.

M. Morin avait déjà constaté, par des expériences faites au Bouchet, que le frein de Prony fonctionne d'une manière favorable à de grandes vitesses.

ÉCOULEMENT DE L'EAU.

129 (*Int.*, 1263 à 1285, pour l'équilibre des fluides et des corps plongeants, et pour les moyens de mesurer la pression des fluides). Le *mouvement* d'un fluide est dit *permanent* (le *régime* est *permanent*), lorsque les hauteurs des niveaux, les aires des sections transversales de la masse fluide, et les vitesses du fluide en chacun des points de ces sections sont constantes.

De la nature propre des fluides, les molécules étant contiguës les unes aux autres sans interruption, ce que l'on exprime en disant qu'il y a *continuité du fluide*, il résulte que pour les liquides, que l'on peut considérer comme étant incompressibles (2e partie), il passe dans chaque section le même volume de fluide à chaque instant quand le régime est permanent.

Pour les gaz, la permanence du mouvement exige bien, comme pour les liquides, que le même poids de fluide passe dans chaque tranche dans le même temps; mais les pressions étant variables d'une section à une autre, il en résulte que les volumes écoulés sont variables pour chaque tranche.

130. *Hypothèse du parallélisme des tranches.* Afin de pouvoir analyser les phénomènes de l'écoulement des fluides, on a été obligé de supposer le parallélisme des tranches, c'est-à-dire d'admettre que toute



la masse fluide est composée de tranches très-minces, normales à la direction du mouvement du fluide, se mouvant en restant constamment parallèles à elles-mêmes, conservant toujours le même volume et ne faisant que s'élargir ou se rétrécir suivant que le vase dans lequel elles se meuvent s'élargit ou se rétrécit. La vitesse du fluide est supposée être la même en tous les points de chaque section.

On conçoit que ces hypothèses ne sont à peu près réalisées que dans le cas où le fluide se meut dans des vases, des canaux ou des tuyaux de conduite dont la forme continue et régulière ne varie que par degrés insensibles.

131. Supposant que les parois du vase sont continues et tellement raccordées avec l'orifice d'écoulement, que l'on puisse, si cela était entièrement possible, considérer le parallélisme des tranches comme réalisé, on prouve théoriquement (*Int.*, 1288), que le niveau restant constant dans le vase, d'où naît la permanence du mouvement, on a

$$v = \sqrt{2gh}, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{v^2}{2g}.$$

v vitesse d'écoulement ;
h *hauteur génératrice* ou *hauteur de chute;* c'est la hauteur du niveau du liquide dans le vase au-dessus du centre de gravité de l'orifice.

Écoulement en mince paroi. Lorsque l'écoulement a lieu en mince paroi, c'est-à-dire quand l'épaisseur de la paroi dans laquelle est pratiqué l'orifice d'écoulement est moindre que la plus petite dimension de l'orifice, et au maximum de $0^m,05$ à $0^m,06$, la vitesse avec laquelle l'eau s'écoule est, comme dans le cas précédent, très-sensiblement donnée par la formule de Toricelli,

$$v = \sqrt{2gh}.$$

v peut être appelé *vitesse théorique ;* la *vitesse réelle* est moindre, mais seulement de 0,01 à 0,02 de v. Cette diminution de vitesse est due au frottement de l'eau contre les parois de l'orifice et à la résistance de l'air.

La formule fait voir que dans les cas précédents d'écoulement de l'eau, la vitesse théorique est celle qu'acquerrait un grave en tombant dans le vide de la hauteur h (18).

132. *TABLE des vitesses théoriques* v *correspondant à différentes hauteurs de chute.*

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0.001	0.140	0.42	2.870	0.02	4.248	1.42	5.278	1.02	6.138
0.002	0.198	0 43	2.904	0.03	4.271	1.43	5.207	1.03	6.154
0.003	0.243	0.44	2.038	0.04	4.204	1.44	5.315	1.04	6.170
0.004	0.280	0.45	2 971	0.95	4.317	1.45	5.333	1.05	6.186
0.005	0.313	0.46	3.004	0.96	4 340	1.46	5.351	1.96	6.202
0.006	0.343	0.47	3.637	0.07	4.362	1.47	5.370	1.97	6.217
0.007	0.370	0.48	3.060	0.98	4.384	1.48	5.388	1.08	6.232
0.008	0.395	0.40	3.100	0.00	4.407	1.40	5.406	1.90	6 248
0.000	0.420	0.50	3.132	1.00	4.420	1.50	5.425	2.00	6.264
0.01	0.443	0 51	3.163	1.01	4.451	1.51	5.443	2.01	6.270
0.02	0.626	0.52	3.104	1.02	4.473	1.52	5.461	2.02	6.205
0.03	0.767	0.53	3.224	1.03	4.405	1.53	5.470	2.03	6.311
0.04	0.886	0.54	3.253	1.04	4.517	1.54	5.406	2.04	6.326
0.05	0.990	0.55	3.285	1.05	4.530	1.55	5.514	2.05	6.341
0 06	1.085	0.56	3.314	1.06	4.560	1.56	5.532	2.06	6.357
0.07	1.172	0.57	3.344	1.07	4.582	1.57	5.550	2.07	6.372
0 08	1.253	0 58	3.373	1.08	4.603	1.58	5.567	2.08	6.388
0.09	1.320	0.50	3 402	1.00	4.624	1.50	5.585	2.09	6.403
0.10	1.401	0.60	3.431	1.10	4.645	1.60	5.603	2.10	6.418
0.11	1.468	0.61	3.450	1.11	4.666	1.61	5.620	2.11	6.434
0.12	1.534	0.62	3.488	1.12	4.687	1.62	5.637	2.12	6.440
0.13	1.597	0 63	3.516	1.13	4.708	1.63	5.655	2.13	6.464
0.14	1.657	0.64	3.543	1.14	4.720	1 64	5.672	2.14	6.470
0.15	1.715	0.65	3.571	1.15	4.750	1.65	5.690	2.15	6.494
0.16	1.772	0.66	3.598	1.16	4 770	1.66	5.707	2.16	6.510
0.17	1.826	0.67	3.625	1.17	4.700	1.67	5.724	2.17	6.525
0.18	1.870	0.68	3.652	1.18	4.811	1.68	5.741	2.18	6.540
0.10	1.031	0.60	3.670	1.10	4.831	1.60	5.758	2.10	6.555
0.20	1.081	0.70	3.706	1.20	4.852	1.70	5.775	2.20	6.570
0.21	2.030	0.71	3.732	1.21	4.872	1.71	5.702	2.21	6.584
0.22	2.078	0.72	3.758	1.22	4.802	1.72	5.800	2.22	6.590
0.23	2.124	0.73	3.784	1.23	4.013	1.73	5.826	2.23	6.614
0.24	2.170	0.74	3.810	1.24	4.033	1.74	5.842	2.24	6.620
0.25	2.215	0.75	3.836	1.25	4.053	1.75	5.850	2.25	6.644
0.26	2.250	0.76	3.862	1.26	4.072	1.76	5.876	2.26	6.658
0.27	2.301	0.77	3.886	1.27	4.001	1.77	5.803	2.27	6.673
0.28	2.344	0.78	3 011	1.28	5.011	1.78	5.000	2.28	6.688
0.29	2.385	0.79	3.036	1.20	5.031	1.79	5.026	2.20	6.703
0.30	2.426	0.80	3.061	1.30	5.050	1.80	5.042	2.30	6.717
0.31	2.466	0.81	3.086	1.31	5.069	1.81	5.050	2.31	6.732
0.32	2.506	0.82	4.011	1.32	5.080	1.82	5.075	2.32	6.746
0.33	2.544	0.83	4.035	1.33	5.108	1.83	5.002	2.33	6.761
0.34	2.582	0 84	4.030	1.34	5.127	1.84	6.008	2.34	6.775
0.35	2.620	0.85	4.083	1.35	5.146	1.85	6.024	2.35	6.700
0.36	2 658	0.86	4.197	1.36	5.165	1.86	6.041	2.36	6.804
0.37	2.604	0 87	4.131	1.37	5.184	1.87	6.057	2.37	6.810
0.38	2.730	0.88	4 155	1.38	5.203	1 88	6 073	2.38	6.833
0.30	2.766	0.80	4.178	1.30	5.222	1.80	6.080	2.30	6.847
0.40	2 801	0.00	4.202	1.40	5.241	1.00	6.105	2.40	6.862
0.41	2.836	0.91	4.225	1.41	5.259	1.91	6.122	2.41	6.876

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
2.42	6.890	2.94	7.594	3.46	8.239	3.98	8.836	4.50	9.396
2.43	6.904	2.95	7.607	3.47	8.251	3.99	8.847	4.51	9.406
2 44	6.619	2.96	7.620	3.48	8.263	4.00	8.858	4.52	9.417
2.45	6.933	2.97	7.633	3.49	8.274	4.01	8.869	4.53	9.427
2.46	6.947	2.98	7.646	3.50	8.286	4.02	8.880	4 54	9.437
2.47	6.961	2.99	7 659	3.51	8.298	4.03	8.892	4.55	9.448
2.48	6.975	3.00	7.672	3.52	8.310	4.04	8.903	4.56	9.458
2.49	6.989	3.01	7.684	3.53	8.322	4.05	8.914	4.57	9.468
2.50	7.003	3.02	7.697	3.54	8.333	4.06	8.925	4.58	9.479
2.51	7.017	3.03	7.710	3.55	8.345	4.07	8.936	4.59	9 489
2.52	7.031	3.04	7.722	3.56	8.357	4.08	8.946	4.60	9.500
2.53	7.045	3.05	7.735	3.57	8.369	4.09	8.957	4.61	9.510
2.54	7.059	3.06	7.748	3.58	8.380	4.10	8.968	4.62	9.520
2.55	7.073	3.07	7.760	3 59	8.392	4.11	8.979	4.63	9.530
2.56	7.087	3.08	7.773	3.60	8.404	4.12	8.990	4.64	9.541
2.57	7.101	3.09	7.786	3.61	8.415	4.13	9.001	4.65	9.551
2.58	7.114	3.10	7.798	3.62	8.427	4.14	9.012	4.66	9.561
2.59	7.128	3.11	7.811	3.63	8.439	4.15	9.023	4.67	9.572
2.60	7.142	3.12	7.823	3.64	8.450	4.16	9.034	4.68	9.582
2.61	7.156	3.13	7.836	3.65	8.462	4.17	9.045	4.69	9.592
2.62	7.169	3.14	7.849	3.66	8.474	4.18	9.055	4.70	9.602
2.63	7.183	3.15	7.861	3.67	8.485	4.19	9.066	4.71	9.612
2.64	7.197	3.16	7.873	3.68	8.497	4.20	9.077	4.72	9.623
2.65	7.210	3.17	7.886	3.69	8 508	4.21	9.088	4.73	9.633
2.66	7.224	3.18	7.898	3.70	8.520	4.22	9.099	4.74	9.643
2.67	7.237	3.19	7 911	3.71	8.531	4.23	9.109	4.75	9.653
2.68	7.251	3.20	7.923	3.72	8.543	4.24	9.120	4.76	9.663
2.69	7.265	3.21	7.936	3.73	8.554	4.25	9.131	4.77	9.673
2.70	7.278	3.22	7.948	3.74	8.566	4.26	9.142	4.78	9.684
2.71	7.291	3.23	7.960	3.75	8.577	4.27	9.152	4.79	9.694
2.72	7.305	3.24	7.973	3.76	8.588	4.28	9.163	4.80	9.704
2.73	7.318	3.25	7.985	3.77	8.600	4.29	9.174	4.81	9.714
2.74	7.332	3.26	7.997	3.78	8.611	4.30	9.185	4.82	9.724
2.75	7.345	3.27	8.009	3.79	8.623	4.31	9.195	4.83	9.734
2.76	7.358	3.28	8.022	3.80	8.634	4.32	9.206	4.84	9.744
2.77	7.372	3.29	8.034	3.81	8.645	4.33	9.217	4.85	9.754
2.78	7.385	3.30	8.046	3.82	8.657	4.34	9.227	4.86	9.764
2.79	7.398	3.31	8.058	3.83	8.668	4.35	9.238	4.87	9.774
2.80	7.411	3.32	8.070	3.84	8.679	4.36	9.248	4.88	9.784
2.81	7.425	3.33	8.082	3.85	8.691	4.37	9.259	4.89	9.794
2.82	7.437	3.34	8.095	3.86	8.702	4.38	9.270	4.90	9.804
2.83	7.451	3.35	8.107	3.87	8.713	4.39	9.280	4.91	9.814
2.84	7.464	3.36	8.119	3.88	8.725	4.40	9.291	4 92	9.824
2.85	7.477	3.37	8.131	3.89	8.736	4.41	9.301	4.93	9.834
2.86	7.490	3.38	8.143	3 90	8.747	4.42	9.312	4.94	9.844
2.87	7.503	3.39	8.155	3.91	8.758	4.43	9.322	4.95	9.854
2.88	7.517	3.40	8 167	3.92	8.769	4.44	9.333	4.96	9.864
2.89	7.530	3.41	8.179	3.93	8.780	4.45	9.343	4.97	9.874
2.90	7.543	3.42	8.191	3 94	8.792	4.46	9.354	4.98	9.884
2.91	7.556	3.43	8.203	3.95	8.803	4.47	9.364	4.99	9.894
2.92	7.569	3.44	8.215	3.96	8.814	4.48	9.375	5.00	9.904
2.93	7.582	3.45	8.227	3.97	8.825	4.49	9.385		

133. *Écoulement à gueule-bée.* Lorsque l'écoulement a lieu à gueule-bée, c'est-à-dire quand les filets fluides se rapprochent des parois de l'orifice, ce qui a lieu quand l'épaisseur de la paroi est égale à une fois ou une fois 1/2 sa plus petite dimension, ou que cet orifice est prolongé d'un ajutage dont la longueur est égale à 3 ou 4 fois la plus petite dimension de l'orifice, on a, dans les cas ordinaires d'écoulement de l'eau,

$$v' = 0,82v = 0,82\sqrt{2gh}.$$

v' vitesse réelle avec laquelle l'eau s'écoule;
$v = \sqrt{2gh}$ vitesse théorique d'écoulement (131 et 132).

134. *Lorsque l'écoulement a lieu par un orifice noyé sur les deux faces*, on a

$$v = \sqrt{2g(h - h')}.$$

v vitesse théorique d'écoulement;
h hauteur du niveau de l'eau dans le vase alimentaire, au-dessus du centre de gravité de l'orifice;
h' hauteur du niveau de l'eau dans le vase alimenté, au-dessus du centre de gravité de l'orifice;
$(h - h')$ différence de niveau de l'eau dans les deux vases, ou hauteur génératrice.

135. *Si le liquide qui s'écoule était soumis à une pression étrangère*, à celle d'un piston, par exemple, on aurait

$$v = \sqrt{2g(h + h')}.$$

v vitesse théorique;
h hauteur du niveau du liquide au-dessus du centre de gravité de l'orifice;
h' pression exercée par le piston, évaluée en une hauteur du liquide qui s'écoule.

136. *Dépense théorique par un orifice d'écoulement.* En négligeant la diminution de la vitesse et la contraction de la veine à la sortie de l'orifice, ce qui suppose le parallélisme des tranches (130), la dépense, que nous appellerons *dépense théorique*, est

$$Q = sv.$$

Q dépense théorique ou volume d'eau théoriquement écoulé par seconde;
s section de l'orifice; pour un orifice rectangulaire dont l est la largeur et h la hauteur, on a $s = l \times h$; pour un orifice circulaire dont r est le rayon, $s = \pi r^2$ (*Int.*, 576 et 603);
$v = \sqrt{2gh}$ vitesse théorique d'écoulement (131, 132).

137. *Dépense effective.* La quantité d'eau qui s'écoule réellement par un orifice se nomme *dépense effective;* elle est toujours moindre que la dépense théorique; on a

$$Q = ksv = ks\sqrt{2gh}.$$

- Q dépense effective;
- sv dépense théorique (136);
- k coefficient, dit *coefficient de contraction*, ou mieux, *coefficient de la dépense;* c'est le rapport de la dépense effective à la dépense théorique; sa valeur dépend surtout de la charge sur l'orifice d'écoulement, et de la forme de cet orifice et de sa position par rapport aux parois du vase.

138. *Contraction complète de la veine.* Pour que la contraction soit complète, c'est-à-dire pour qu'elle s'opère sur tout le contour de l'orifice, il faut que cet orifice soit éloigné du fond et des parois du vase de au moins une fois 1/2 à 2 fois sa plus petite dimension. C'est pour ce cas et pour des orifices rectangulaires verticaux en mince paroi, que MM. Poncelet et Lesbros ont déterminé les valeurs du coefficient de la dépense consignées dans le tableau suivant.

1. *Les charges étant la hauteur du niveau, en un point du réservoir où l'eau est parfaitement stagnante, au-dessus de l'arête supérieure de l'orifice.*

CHARGE sur le sommet des orifices.	Valeurs du coefficient k pour des hauteurs d'orifice de					
	0m.20	0m.10	0m.05	0m.03	0m.02	0m.01
m.						
0.000	»	»	»	»	»	»
0.005	»	»	»	»	»	0.705
0.010	»	»	0.607	0.630	0.666	0.701
0.015	»	0.593	0.612	0.632	0.660	0.697
0.020	0.572	0.596	0.615	0.634	0.659	0.694
0.030	0.578	0.600	0.620	0.638	0.659	0.688
0.040	0.582	0.603	0.623	0.640	0.658	0.683
0.050	0.585	0.605	0.625	0.640	0.658	0.679
0.060	0.587	0.607	0.627	0.640	0.657	0.676
0.070	0.588	0.609	0.628	0.639	0.656	0.673
0.080	0.589	0.610	0.629	0.638	0.656	0.670
0.090	0.591	0.610	0.629	0.637	0.655	0.668
0.100	0.592	0.611	0.630	0.637	0.654	0.666
0.120	0.593	0.612	0.630	0.636	0.653	0.663
0.140	0.595	0.613	0.630	0.635	0.651	0.660
0.160	0.596	0.614	0.631	0.634	0.650	0.658
0.180	0.597	0.615	0.630	0.634	0.649	0.657
0.200	0.598	0.615	0.630	0.633	0.648	0.655
0.250	0.599	0.616	0.630	0.632	0.646	0.653
0.300	0.600	0.616	0.629	0.632	0.644	0.650
0.400	0.602	0.617	0.628	0.631	0.642	0.647
0.500	0.603	0.617	0.628	0.630	0.640	0.644
0.600	0.604	0.617	0.627	0.630	0.638	0.642
0.700	0.604	0.616	0.627	0.629	0.637	0.640
0.800	0.605	0.616	0.627	0.629	0.636	0.637
0.900	0.605	0.615	0.626	0.628	0.634	0.635
1.000	0.605	0.615	0.626	0.628	0.633	0.632
1.100	0.604	0.614	0.625	0.627	0.631	0.629
1.200	0.604	0.614	0.624	0.626	0.628	0.626

CHARGE sur le sommet de l'orifice.	Valeurs du coefficient k pour des hauteurs d'orifice de					
	0m.20	0m.10	0m.05	0m.03	0m.02	0m.01
m. 1.300	0.603	0.613	0.622	0.624	0.625	0.622
1.400	0.603	0.612	0.621	0.622	0.622	0.618
1.500	0.602	0.611	0.620	0.620	0.619	0.615
1.600	0.602	0.611	0.618	0.618	0.617	0.613
1.700	0.602	0.610	0.617	0.616	0.615	0.612
1.800	0.601	0.609	0.615	0.615	0.614	0.612
1.900	0.601	0.608	0.614	0.613	0.612	0.611
2.000	0.601	0.607	0.613	0.612	0.612	0.611
3.000	0.601	0.603	0.606	0.008	0.610	0.609
2° *Les charges étant la hauteur du niveau de l'eau, immédiatement au-dessus de l'orifice, au-dessus de l'arête supérieure de cet orifice.*						
0.000	0.619	0.667	0.713	0.766	0.783	0.795
0.005	0.597	0.630	0.668	0.725	0.750	0.778
0.010	0.595	0.618	0.642	0.687	0.720	0.762
0.015	0.594	0.615	0.639	0.674	0.707	0.745
0.020	0.594	0.614	0.638	0 668	0.697	0.729
0.030	0.593	0.613	0.637	0.659	0.685	0.708
0.040	0.593	0.612	0.636	0.654	0.678	0.695
0.050	0.593	0.612	0.636	0.651	0.672	0.686
0.060	0.594	0.613	0.635	0.647	0.668	0.681
0.070	0.594	0.613	0.635	0.645	0.665	0.677
0.080	0.594	0.613	0 635	0 643	0.662	0.675
0.090	0.595	0.614	0.634	0.641	0.659	0.672
0.100	0.595	0.614	0.634	0.640	0.657	0.669
0.120	0 596	0.614	0.633	0.637	0.655	0.665
0.140	0.597	0 614	0.632	0.636	0.653	0.661
0.160	0.597	0.615	0.631	0.635	0.651	0.659
0.180	0.598	0.615	0.631	0.634	0.650	0.657
0.200	0.599	0.615	0.630	0.633	0.649	0.656
0.250	0.600	0.616	0.630	0.632	0.646	0.653
0.300	0.601	0.616	0.629	0.632	0.644	0.651
0.400	0.602	0.617	0.629	0.631	0.642	0.647
0.500	0.603	0.617	0 628	0.630	0.640	0.645
0.600	0.604	0.617	0 627	0.630	0.638	0.643
0.700	0.604	0.616	0.627	0.629	0.637	0.640
0.800	0.605	0.616	0.627	0.629	0.636	0.637
0.900	0.605	0.615	0.626	0.628	0.634	0.635
1.000	0.605	0.615	0.626	0.628	0.633	0.632
1.100	0.604	0.614	0.625	0.627	0.631	0.629
1.200	0.604	0.614	0.624	0.626	0.628	0.626
1.300	0.603	0.613	0.622	0.624	0.625	0.622
1.400	0.603	0.612	0.621	0.622	0.622	0.618
1.500	0.602	0.611	0.620	0.620	0.619	0.615
1.600	0.602	0.611	0.618	0.618	0.617	0.613
1.700	0.602	0.610	0 617	0.616	0.615	0.612
1.800	0.601	0.609	0.615	0.615	0.614	0.612
1.900	0.601	0.608	0.614	0.613	0.613	0.611
2.000	0.601	0.607	0.614	0.612	0.612	0.611
3.000	0.601	0.603	0.606	0.608	0.610	0.609



Lorsque la hauteur de l'orifice dépasse 0m,20, on peut prendre pour coefficients de la dépense ceux de la hauteur 0m,20.

Les coefficients du tableau précédent s'appliquent à un orifice de forme quelconque, sans angle rentrant, pourvu que la plus petite dimension de l'orifice soit la hauteur du tableau, et ils s'appliquent aux orifices noyés comme à ceux qui débouchent à l'air libre; seulement, dans ce dernier cas, la hauteur génératrice est la différence des niveaux de l'eau au-dessus des deux faces de l'orifice (134); ainsi on a

$$Q = ks\sqrt{2g(h-h')}.$$

139. *Contraction incomplète.* Lorsqu'une partie du contour de l'orifice fait prolongement aux parois du vase, la contraction est supprimée sur cette partie, et, par suite, elle est incomplète. Dans ce cas, d'après les expériences de Bidone, on a :

1° Pour les orifices rectangulaires,

$$k' = k\left(1 + 0{,}1523\frac{n}{p}\right);$$

2° Pour les orifices circulaires,

$$k' = k\left(1 + 0{,}1279\frac{n}{p}\right).$$

k' coefficient de la dépense dans le cas de la contraction incomplète;
k coefficient de la dépense dans le cas de la contraction complète; sa valeur est celle indiquée au tableau du n° 138;
n portion du contour de l'orifice sur laquelle la contraction est supprimée;
p périmètre total de l'orifice.

Application. Quel est le volume d'eau qui s'écoule en une seconde par un orifice rectangulaire de 0m,20 de largeur et 0m,10 de hauteur, la charge au-dessus de l'arête supérieure de l'orifice, mesurée en un point où l'eau est stagnante, étant 1m,00, et la contraction de la veine étant complète?

Faisant $k = 0{,}615$, $s = 0{,}20 \times 0{,}10$ et $h = 1{,}00$ dans la formule du n° 137, on a

$$Q = 0{,}615 \times 0{,}20 \times 0{,}10\sqrt{2 \times 9{,}8088 \times 1} = 0^{\text{m. cu.}},545.$$

Si la contraction de la veine était supprimée sur un côté, si par exemple l'arête inférieure de l'orifice était dans le prolongement du fond du réservoir, dans l'application précédente il faudrait faire

$$k = 0{,}615\left(1 + 0{,}1523\frac{0{,}20}{0{,}60}\right) = 0{,}615 \times 1{,}0508 = 0{,}646.$$

Il est évident que si l'on avait calculé la dépense $0^{m.\,cu.},545$ pour le cas précédent, on aurait pour ce dernier cas

$$Q = 0{,}545 \times 1{,}050\,8 = 0^{m.\,cu.},572.$$

140. *Lorsque l'orifice est prolongé à l'intérieur du vase par un tuyau assez court pour que l'écoulement n'ait pas lieu à gueule-bée* (133), ce que l'on reconnait à la simple vue, le coefficient de la dépense est, d'après les expériences de Borda et celles de Bidone, $k = 0{,}50$.

On voit que cette disposition, que l'on rencontre quelquefois dans les appareils hydrauliques et dans les jets d'eau, est très-désavantageuse à la dépense.

141. *La largeur de l'orifice paraît avoir quelque influence sur la dépense.* Quoique l'on ait peu d'expériences à cet égard, on peut admettre, pour un orifice de $1^m,50$ de largeur, avec des charges sur le sommet variant de $0^m,05$ à $0^m,20$ et une contraction complète, les valeurs suivantes du coefficient de la dépense :

Hauteur de l'orifice. .	m 0.05	m 0.06	m 0.07	m 0.08	m 0.09	m 0.10	m 0.12	m 0.14	m 0.16	m 0.18	m 0.20
Coefficient k.	0.728	0.708	0.695	0.687	0.682	0.679	0.675	0.675	0.675	0.675	0.675

142. *Vanne d'écluse.* Pour une vanne d'écluse, dont le seuil est en général très-rapproché du fond du radier d'amont, le coefficient de la dépense est 0,625, que la vanne soit ou non noyée sur les deux faces.

Application. Quelle est la dépense par seconde d'une vanne de $1^m,20$ de largeur et de $0^m,20$ de levée, la charge sur le centre de l'orifice étant $2^m,50$?

Le tableau du n° 132 donnant $7^m,003$ pour vitesse d'écoulement, la dépense est

$$0{,}625 \times 1{,}20 \times 0{,}20 \times 7{,}003 = 1^{m.\,cu.},050.$$

143. *Orifices voisins.* Pour deux vannes très-rapprochées, comme celles des portes busquées d'une écluse à sas, on prenait pour coefficient de la dépense 0,55 ; mais des expériences faites par M. Castel ont démontré que le voisinage de deux ou de trois orifices ne change pas le coefficient de la dépense ; il conviendra donc, comme dans le cas précédent, de le faire égal à 0,625.

144. *Vannes inclinées.* Pour des vannes inclinées, comme celles des roues à la Poncelet, dont la face inférieure et les deux faces latérales sont dans le prolongement des parois du réservoir, on a $k = 0{,}74$ pour une inclinaison de 1 de base sur 2 de hauteur, et $k = 0{,}80$ pour une inclinaison de 1 de base sur 1 de hauteur. La section s de la vanne (136)

se prend égale au produit de la largeur par la hauteur de l'ouverture, cette hauteur étant mesurée verticalement et non suivant l'inclinaison de la vanne. (Pour la charge à prendre dans le cas des roues à la Poncelet, consulter ce genre de roues.)

145. *Orifices en déversoir.* Pour les orifices en déversoir, la dépense effective est donnée par la formule

$$Q = kLH\sqrt{2gH}.$$

Q volume d'eau écoulé par seconde;
k coefficient de la dépense; d'après MM. Poncelet et Lesbros, dans les cas ordinaires d'application, $k = 0,405$;
L largeur du déversoir;
H hauteur du niveau de l'eau au-dessus du seuil du déversoir; cette hauteur se mesure en un point où le dénivellement ne se fait plus sentir, c'est-à-dire à 8 ou 4 mètres en amont du déversoir.

TABLEAU des valeurs de k *pour différentes hauteurs* H, *d'après MM. Poncelet et Lesbros.*

(L'orifice avait 0m.20 de largeur; il était placé à 0m.54 du fond et à 1m.74 environ de chacune des parois verticales; ses bords étaient à arêtes vives.)

	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Valeurs de H. .	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.20	0.22
Valeurs de k. .	0.424	0.417	0.412	0.407	0.401	0.397	0.395	0.393	0.390	0.385

Le coefficient moyen 0,405 devient 0,443 environ, quand le déversoir a la même largeur que le canal d'arrivée, et que la profondeur de celui-ci n'excède pas quatre fois la charge sur le seuil du déversoir.

146. H étant la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir au-dessus du seuil du déversoir, et h l'épaisseur de la lame d'eau, mesurée sur l'arête intérieure du seuil même du déversoir, on a $H = 1,178\,h$, quand la largeur du déversoir est les 4/5 de celle du réservoir, et $H = 1,25\,h$, quand ces deux largeurs sont égales. Ces rapport servent à calculer H quand on ne peut déterminer sa valeur par l'expérience, ce qui arrive, par exemple, quand le canal est couvert en amont du déversoir.

147. *Pour un déversoir formé par la vanne inclinée d'une roue de côté, ayant la même largeur que le canal d'arrivée, et arrondie à sa partie supérieure*, cas qui se présente souvent dans la pratique, et qui n'a pas été suffisamment étudié, M. Morin rapporte les résultats suivants, obtenus au Bouchet. La vanne avait 2m,017 de largeur et 0m,08 d'épaisseur; elle était inclinée à 63°; son bord supérieur était à vive arête du côté d'amont et arrondi du côté d'aval.

Valeurs de H.	m 0.04	m 0.05	m 0.06	m 0.07	m 0.08	m 0.09	m 0.10	m 0.12	m 0.14	m 0.16	m 0.18	m 0.20
Coefficient k.	0.264	0.313	0.355	0.390	0.418	0.437	0.448	0.460	0.467	0.472	0.477	0.482

Pour les petites charges, l'eau mouillait et suivait la surface de la vanne, au lieu que pour les plus fortes, la veine fluide se détachait complétement; c'est ce qui explique la grande variation de k.

Il conviendrait d'étendre ces expériences, qui fourniraient des résultats très-utiles pour la pratique.

148. *Déversoirs incomplets.* Il peut arriver que l'eau ait en aval du déversoir un niveau supérieur au seuil de ce déversoir. Dans ce cas, on calcule approximativement la dépense en considérant l'orifice du déversoir comme composé de deux parties : l'une supérieure au niveau de l'eau en aval, et dont on calcule le débit comme pour un déversoir dont la charge est égale à la profondeur du canal d'arrivée, c'est-à-dire en faisant $k = 0,443$ (145) ; l'autre inférieure à ce niveau, et dont la dépense se calcule comme celle d'un orifice noyé sur les deux faces, en prenant pour charge la différence des niveaux de l'eau en amont et en aval du déversoir (138).

149. *Orifices en déversoir prolongés d'un coursier peu incliné.* Dans ce cas, les charges étant toujours mesurées en un point où le dénivellement ne se fait plus sentir, on peut prendre pour coefficient de la dépense les valeurs suivantes :

Charges sur le seuil du déversoir.	m 0.20	m 0.15	m 0.10	m 0.06	m 0.04	m 0.03
Valeurs du coefficient k.	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.23

150. *Orifices circulaires garnis d'ajutages cylindriques de même diamètre.* Dans ce cas, il résulte des expériences faites par Eytelwein avec une série de tubes de $0^m,026$ de diamètre, que le coefficient de la dépense (137) varie avec le rapport de la longueur de l'ajutage à son diamètre, et qu'il est respectivement pour les rapports

1 et au-dessous,	2 à 3,	12,	24,	36,	43,	60 :
0,62,	0.82,	0.77,	0.73,	0.68,	0.63,	0.60.

151. *Orifices circulaires garnis d'ajutages coniques convergents*, c'est-à-dire d'ajutages dont le diamètre va en diminuant à partir de la paroi du vase. Dans ce cas, on prend pour section de l'orifice celle de l'extrémité de l'ajutage, et pour charge génératrice, la charge sur le

centre de cette extrémité. M. Castel, en opérant sur des ajutages dont la longueur était égale à 2,6 fois le diamètre à l'extrémité, a trouvé pour coefficient de la dépense (137) et pour coefficient de la vitesse (131 et 135), les résultats du tableau suivant, qui varient, comme on le voit, avec l'angle de convergence que font entre elles les génératrices de l'ajutage.

ANGLES de convergence.	COEFFICIENTS de la dépense.	COEFFICIENTS de la vitesse.	ANGLES de convergence.	COEFFICIENTS de la dépense.	COEFFICIENTS de la vitesse.
0° 0′	0.829	0.830	13° 24′	0.946	0.962
1 36	0.866	0.866	14 28	0.941	0.966
3 10	0.895	0.894	16 36	0.938	0.971
4 10	0.912	0.910	19 28	0.924	0.970
5 26	0.924	0.920	21 0	0.918	0.971
7 52	0.929	0.931	23 0	0.913	0.974
8 58	0.934	0.942	29 58	0.896	0.975
10 20	0.938	0.950	40 20	0.869	0.980
12 4	0.942	0.955	48 50	0.847	0.984

Les résultats de ce tableau ont été obtenus avec une série d'ajutages dont le diamètre à l'extrémité était $0^m,015\,5$. Une autre série dont le diamètre était $0^m,020$ a donné des résultats de si peu supérieurs à ces premiers, que l'on peut supposer que la différence provient d'une légère erreur dans l'évaluation des diamètres.

Ces expériences, qui ont été faites sous des charges qui ont varié de $0^m,215$ à $3^m,030$, prouvent que les coefficients de la dépense et de la vitesse sont indépendants de la charge.

152. *Ajutages coniques divergents.* Le tableau suivant donne les résultats obtenus par Venturi, en opérant sous une charge constante de $0^m,88$. Les tubes portaient à leur extrémité adaptée au vase une embouchure convergente à peu près de la forme de la veine contractée. Cette embouchure avait $0^m,040\,6$ de diamètre près du vase, et $0^m,033\,8$ au point d'où ses génératrices commençaient à diverger.

LONGUEURS des ajutages.	ANGLES de divergence.	COEFFICIENTS de la dépense.	LONGUEURS des ajutages.	ANGLES de divergence.	COEFFICIENTS de la dépense.
m			m		
0.111	3° 30′	0.93	0.059	5° 44′	0.82
0.334	4 38	1.21	0.264	10 16	0.91
0.460	4 38	1.21	0.045	10 16	0.91
0.460	4 38	1.34	0.045	14 14	0.61
0.176	5 44	1.02			

Venturi conclut de ses expériences que la dépense est maximum quand

la longueur de l'ajutage est égale à 9 fois le diamètre de la plus petite base, et que l'angle de divergence que font entre elles les génératrices est de 5° 6'. Avec ces proportions, dit l'auteur, la dépense est égale à 2,4 fois la dépense du même orifice en mince paroi, ou à 1,46 fois la dépense théorique.

153. *Orifices accompagnés d'un coursier.* Bossut et, plus tard, MM. Poncelet et Lesbros ont constaté que la présence d'un coursier plus ou moins incliné n'a pas une influence sensible sur la dépense d'une vanne, si la hauteur génératrice n'est pas au-dessous de

0m.50 à 0m.60	pour des orifices de	0m.15 à 0m.20	de hauteur,
0m.30 à 0m.40	id.	0m.10	id.
0m.20	id.	0m.05 et au-dessous,	id.

Pour des charges inférieures, le coursier a une légère influence sur la dépense, et, dans ces cas, qui ne se présentent presque jamais dans la pratique, on peut considérer les valeurs du tableau suivant comme des coefficients moyens pour les dispositions ordinaires de coursier.

HAUTEUR de l'orifice.	CHARGE sur le centre de l'orifice.	COEFFICIENT moyen.	HAUTEUR de l'orifice.	CHARGE sur le centre de l'orifice.	COEFFICIENT moyen.
m	m		m	m	
0.20	0.40	0.588	0.05	0.20	0.625
id.	0.24	0.563	id.	0.11	0.605
id.	0.12	0.484	id.	0.05	0.488
0.10	0.16	0.591	id.	0.04	0.439
id	0.11	0.563	0.03	0.20	0.638
id.	0.09	0.517	id.	0.06	0.601
id.	0.06	0.462			

On pourra calculer la vitesse moyenne de l'eau dans le coursier, à une distance de l'orifice égale à 1,5 ou 2 fois la plus petite dimensiou de cet orifice, à l'aide de la formule suivante, donnée par Navier, pour le cas des orifices garnis d'ajutages prismatiques,

$$U=\sqrt{\frac{2gH}{1+\left(\frac{1}{k}-1\right)^2}}$$

U vitesse moyenne cherchée;
H hauteur du niveau de l'eau au-dessus du centre de gravité de l'orifice;
k coefficient de la dépense applicable à l'orifice.

Supposant $k=0.62$, la formule donne $U=0.855\sqrt{2gH}$, au lieu de $0.82\sqrt{2gH}$, que donne l'expérience pour les ajutages cylindriques (133).

En négligeant le frottement de l'eau contre les parois du coursier, on a

$$u = \sqrt{2g(h+h')}.$$

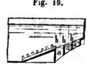
u vitesse moyenne à l'extrémité du coursier;

$h = \frac{U^2}{2g}$ hauteur due à la vitesse à l'origine du coursier (131);

h' pente totale du coursier.

154. *Orifices garnis d'ajutages-directeurs* (fig. 19). Dans les roues à augets qui prennent l'eau en dessous du sommet, il arrive souvent que l'orifice de la vanne est garni d'un certain nombre d'ajutages qui dirigent l'eau dans les augets. Dans ce cas on considère séparément chaque ajutage découvert, et on prend, dans le calcul de la dépense (137), pour largeur de la vanne, celle de l'ajutage; pour levée de la vanne, la plus petite distance a ou a' ou a''..... des diaphragmes qui forment l'ajutage considéré; pour hauteur génératrice, la hauteur h ou h' ou h''..... du niveau de l'eau au-dessus du centre de gravité de la plus petite distance a ou a' ou a''.....; enfin, pour coefficient de la dépense, 0.75. La somme des dépenses des différents orifices est la dépense totale.

Fig. 19.



155. Lorsqu'une vanne est accompagnée d'une buse pyramidale appelée *bec de canne*, comme cela a encore lieu pour distribuer l'eau sur la roue dans quelques anciennes usines, dans le calcul de la dépense (137), on prend pour ouverture de la vanne la section de l'extrémité du bec de canne; pour charge génératrice, la charge sur le centre de l'extrémité du bec, et pour coefficient de la dépense, 0,98; cette valeur est tirée des résultats de trois expériences de M. Lespinasse, sur une buse de 2^m,923 de longueur, ayant 0^m,731 sur 0^m,975 à sa grande base, et 0^m,135 sur 0^m,190 à la petite. D'après des expériences de MM. Piobert et Tardy, il convient de faire ce coefficient égal à 0,864 quand les buses sont garnies intérieurement de cadres en bois ou en fer.

156. *Écoulement de l'eau lorsque le niveau est variable sur une ou sur les deux faces de l'orifice d'écoulement, et que le vase qui se vide, ainsi que celui qui se remplit, ont des sections horizontales constantes en tous les points de leur profondeur.*

Ce qui va suivre s'applique principalement aux écluses des canaux de navigation.

Nous avons vu que la dépense en une seconde par un orifice est, lorsque le niveau reste constant (137),

$$Q = ksv = ks\sqrt{2gh}.$$

Le temps nécessaire pour que la dépense soit égale à la capacité de la partie de bassin située au-dessus de l'orifice est alors, pour un bassin prismatique,

$$t = \frac{Ah}{Q} = \frac{Ah}{ks\sqrt{2gh}}. \qquad (a)$$

Q dépense par seconde;
k coefficient de la dépense;
s section de l'orifice d'écoulement;
t durée de l'écoulement, en secondes.
A section horizontale du bassin;
h hauteur du niveau de l'eau au-dessus de l'orifice d'écoulement;
Ah capacité de la partie de bassin située au-dessus de l'orifice d'écoulement, ou dépense pour le temps t.

Lorsque le vase se vide sans qu'il reçoive de liquide, la durée t de la vidange de la partie supérieure à l'orifice est double de ce qu'elle est, pour la même dépense, lorsque le niveau de l'eau reste constant; ainsi, pour le cas de la formule (a), on a

$$t' = 2t = \frac{2Ah}{ks\sqrt{2gh}} = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h}. \qquad (b)$$

Le temps que met le niveau pour descendre d'une quantité $h - h'$ est

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}(\sqrt{h} - \sqrt{h'}). \qquad (c)$$

T durée de l'écoulement en secondes;
h charge sur l'orifice au commencement du temps T;
h' charge sur l'orifice après le temps T.

Si on suppose $h' = 0$ dans la formule précédente, c'est-à-dire, que le niveau baisse de toute la hauteur h, on obtient, comme cela devait avoir lieu, l'expression (b); ainsi on a

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h} = t'.$$

De la formule (c) on tire, pour le temps d'écoulement T, l'abaissement de niveau

$$h - h' = \frac{Tks\sqrt{2g}}{A}\left(\sqrt{h} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4A}\right). \qquad (d)$$

La dépense Q', pour le temps T, est donc

$$Q' = (h - h')A = Tks\sqrt{2g}\left(\sqrt{h} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4A}\right). \qquad (e)$$

Lorsque l'orifice d'écoulement est noyé sur les deux faces, les niveaux restant constants, la dépense est la même que pour l'écoulement à l'air libre, sous une charge égale à la différence $h - h'$ des charges sur les

deux faces de l'orifice ; ainsi on a, en représentant par Q la dépense par seconde,

$$Q = ks\sqrt{2g(h-h')}. \qquad \text{(134 et suivants.)}$$

Supposant que le niveau reste constant dans le bassin supérieur, et que le bassin inférieur ne perde pas d'eau, le temps qu'il faudra pour que le niveau s'établisse dans les deux bassins sera égal au temps (*b*), nécessaire pour la vidange à l'air libre du bassin qui se remplit, placé dans les mêmes circonstances de charges ; ainsi on aura

$$t' = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h}.$$

t' temps nécessaire à l'établissement du niveau ;
A section horizontale du bassin qui se remplit ;
h différence de niveau du liquide dans les deux bassins au commencement du temps t'.

Le temps nécessaire pour que le niveau s'élève d'une quantité $h-h'$, est aussi égal au temps (*c*), nécessaire pour un abaissement de niveau égal à cette élévation si le bassin se vidait dans les mêmes circonstances de charges ; ainsi on a

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}(\sqrt{h}-\sqrt{h'}).$$

T temps que met le niveau à s'élever de la quantité $h-h'$;
h différence de niveau du liquide dans les deux vases au commencement du temps T ;
h' différence de niveau du liquide dans les deux vases à la fin du temps T.

La valeur de $h-h'$ est encore égale à celle donnée par la formule (*d*), et la dépense est aussi égale à celle donnée par la formule (*e*).

Si on suppose que l'orifice d'écoulement étant noyé sur les deux faces, le niveau soit variable dans les deux bassins, c'est-à-dire que l'un des bassins se vide pour remplir l'autre, comme cela a lieu pour deux sas contigus dans un canal de navigation, le temps nécessaire pour que le niveau s'établisse dans les deux bassins est

$$T = \frac{2AB\sqrt{h-h'}}{ks\sqrt{2g}(A+B)}.$$

T durée de l'établissement du niveau ;
$h-h'$ différence de niveau du liquide dans les deux bassins quand on ouvre la vanne ;
A et B sections horizontales des deux bassins.

Cette formule fait voir que T est le même pour une égale valeur de $h-h'$, que A soit la section du bassin qui se vide, et B celle de celui

qui se remplit, ou que B soit la section du premier et A celle du second.

Il peut encore arriver que l'orifice d'écoulement ne soit noyé sur les deux faces que pendant une partie du temps de remplissage. Alors, pour avoir ce temps, on le divise en deux parties : l'une correspondant au remplissage de la portion de bassin inférieure à l'orifice d'écoulement, et que l'on calcule facilement d'après ce qui vient d'être dit, soit que le bassin supérieur se vide ou conserve un niveau constant; l'autre correspondant au remplissage de la portion de bassin supérieure à l'orifice d'écoulement, et que l'on calcule encore facilement, soit que le bassin supérieur se vide ou conserve un niveau constant.

COURS D'EAU.

157. *Cours d'eau à section constante et à pente uniforme.* Lorsque le régime des eaux est établi, c'est-à-dire lorsque le mouvement de l'eau est uniforme, on a

$$Q = Sv, \quad \text{d'où on tire} \quad v = \frac{Q}{S}.$$

Q dépense ou volume d'eau écoulé par seconde (1);
S section du cours d'eau;
v vitesse moyenne d'écoulement de l'eau.

On a aussi, d'après de Prony,

$$I = \frac{P}{S}(av + bv^2). \qquad (a)$$

I pente par mètre; elle est égale à la différence de niveau de deux points de la surface de l'eau, divisée par la distance de ces deux points mesurée suivant l'axe du cours d'eau;
S section transversale du cours d'eau;
v vitesse moyenne du cours d'eau;
P périmètre mouillé; c'est le contour de la section S, diminué de la largeur du canal à la surface de l'eau;
$a = 0{,}000\,044\,4499$, soit $0{,}000\,0444$, coefficient numérique constant;
$b = 0{,}000\,309\,3140$, soit $0{,}000\,309$, *id.*

De Prony, qui a le premier donné la formule précédente, a déterminé les valeurs de a et b, en discutant les résultats de trente et une expériences faites par Dubuat, sur des canaux factices et des rivières dont les sections ont varié de $0^{m.c.},011$ à $29^{m.c.},00$, et la vitesse moyenne, de $0^m,12$ à $0^m,88$.

Eytelwein, en suivant la même marche que de Prony, mais en ajoutant aux résultats de Dubuat ceux obtenus depuis par MM. Brünings, Woltmann et Funk, pour des canaux et des rivières dont la section fluide a varié de $0^{m.c.},014$ à $2\,604^{m.c.},00$, et la vitesse, de $0^m,124$ à $2^m,42$, a conclu, de quatre-vingt-onze résultats, que l'on devait faire dans la

formule de Prony, $a = 0{,}000\,024\,265\,1$, soit $0{,}000\,024$, et $b = 0{,}000\,365\,543\,0$, soit $0{,}000\,365$.

La formule de Prony modifiée par les nouvelles valeurs de a et b d'Eytelwein convient mieux au cas des grandes rivières; mais elle ne s'applique pas également bien aux quatre-vingt-onze expériences discutées par Eytelwein. Les résultats de Dubuat, notamment, sont beaucoup mieux représentées par la formule de Prony. (*Voir* le tableau suivant.)

On appelle *rayon moyen*, le quotient de la section transversale S d'un cours d'eau par le périmètre mouillé P; ainsi, en le représentant par R, on a

$$R = \frac{S}{P};$$

et la formule de Prony donne, en remplaçant a et b par leurs valeurs,

$$RI = 0{,}000\,044\,4v + 0{,}000\,309v^2,$$

d'où on tire (*Int.*, 438)

$$v = \sqrt{0{,}005\,163 + 3\,233{,}428RI} - 0{,}071\,85,$$

ou à peu près

$$v = 56{,}86\sqrt{RI} - 0{,}072.$$

De ces formules on tirera la valeur de v, connaissant I et R, ou celle de la pente I pour obtenir une vitesse $v = \frac{Q}{S}$.

La valeur de R dépend de celle de la section S et de la forme de cette section, forme généralement déterminée par des exigences de localités. Si le canal est en bois ou en maçonnerie, on peut faire les parois verticales, et il convient que la largeur soit égale au double de la profondeur d'eau, afin de rendre le périmètre mouillé et par suite la résistance des parois le plus petits possible. Pour les canaux en terre, les parois sont en talus, et la largeur au fond varie de quatre à six fois la profondeur de l'eau.

M. de Saint-Venant, de la discussion des résultats qui ont servi à de Prony et Eytelwein pour établir la formule précédente, et de quelques autres consignés comme les premiers dans le tableau suivant, a conclu la formule monome

$$RI = 0{,}000\,401\,02\,v^{\frac{21}{11}} \quad \text{d'où} \quad v = 60{,}158\,(RI)^{\frac{11}{21}}$$

ou approximativement

$$RI = 0{,}000\,4\,v^{\frac{21}{11}} \quad \text{et} \quad v = 60\,(RI)^{\frac{11}{21}}.$$

***TABLEAU** calculé par M. de Saint-Venant avec les formules précédentes prises avec le plus d'exactitude* (ANNALES DES MINES, 4e série, t. XX).

EXPÉRIMENTATEURS.	VALEURS de RI.	VITESSES			
		Observées.	De Prony.	Eytelwein.	Saint-Venant
Dubuat.	0.0000080	0.124	0.104	0.118	0.129
Id.	0.0000128	0.154	0.144	0.157	0.105
Id.	0.0000185	0.101	0.170	0.104	0.200
Id.	0.0000214	0.172	0.201	0.211	0.215
Id.	0.0000280	0.212	0.241	0.249	0.251
Id.	0.0000239	0.242	0.216	0.225	0.228
Id.	0.0000310	0.240	0.256	0.263	0.264
Id.	0.0000317	0.263	0 250	0.263	0.265
Woltmann.	0.0000361	0.281	0.277	0.282	0.283
Id.	0.0000307	0.281	0.293	0.298	0.208
Dubuat.	0.0000440	0.301	0.315	0.318	0.317
Woltmann.	0.0000443	0.320	0.313	0.316	0.315
Dubuat.	0.0000427	0.327	0.306	0.310	0.300
Id.	0.0000352	0.334	0.273	0.270	0.270
Id.	0.0000513	0.348	0.341	0.343	0.341
Id.	0.0000406	0.353	0.330	0.337	0.335
Id.	0.0000473	0.367	0.326	0.320	0.326
Id.	0.0000569	0.384	0 360	0.360	0.357
Id.	0.0000605	0.421	0.401	0.404	0.399
Woltmann.	0.0000050	0.430	0.392	0.300	0.386
Dubuat.	0.0001120	0.405	0.536	0.523	0.514
Id.	0.0000959	0.548	0.400	0.480	0.473
Id.	0.0001370	0.549	0.599	0.581	0.571
Id.	0.0001560	0.006	0.644	0.023	0.612
Funk (en petit). . . .	0.0003157	0.633	0.040	0.806	0.882
Dubuat.	0.0001664	0.637	0.065	0.042	0.631
Bonati.	0.0001613	0.687	0.654	0.632	0.621
Dubuat.	0.0002108	0.735	0.757	0.727	0.714
Bonati.	0.0003283	0.730	0.790	0.758	0.745
Dubuat.	0.0001841	0.745	0.703	0.677	0.665
Id.	0.0001870	0.766	0.700	0.683	0.071
Brünings.	0.0002548	0.771	0.838	0.802	0.780
Dubuat.	0.0002212	0.772	0.777	0.745	0.732
Funk.	0.0003083	0.772	0.930	0.885	0.872
Dubuat.	0.0002470	0.776	0.826	0.701	0.777
Id.	0.0002100	0.783	0.773	0.742	0.728
Id.	0.0002412	0.810	0.814	0.780	0.700
Id.	0.0002522	0.863	0.834	0.708	0.784
Id.	0.0002566	0.880	0.842	0.806	0.792
Brünings.	0.0003304	0.917	0.004	0.923	0.904
Id.	0.0004101	0.018	1.004	1.038	1.060
Id.	0.0003020	0.038	1.058	1.004	0.989
Id.	0.0004035	0.075	1.052	1.010	1.003
Funk.	0.0004215	1.011	1.074	1.036	1.027
Id.	0.0006001	1.035	1.423	1.341	1.320
Brünings.	0.0004100	1.030	1.061	1.034	1.020
Funk.	0.0006609	1.057	1 302	1.312	1.209
Brünings.	0.0003950	1.092	1.041	1.007	0.003
École romaine. . . .	0.0003725	1.115	1.028	0.977	0.962

EXPÉRIMENTATEURS.	VALEURS de RI.	VITESSES			
		Observées	De Prony.	Eytelwein.	Saint-Venant
Brünings.	0.0005809	1.122	1.300	1.228	1.214
Ecole romaine.	0.0004627	1.146	1.156	1.095	1.080
Brünings.	0.0005642	1.210	1.280	1.210	1.196
Id.	0.0004648	1.218	1.130	1.094	1.080
Id.	0.0005790	1.225	1.292	1.225	1.212
Funk.	0.0008175	1.226	1.557	1.463	1.435
Id.	0.0007174	1.239	1.453	1.368	1.356
Bonati.	0.0007052	1.269	1.440	1.356	1.344
Brünings.	0 0003580	1.274	1.006	0.957	0.942
Id.	0.0004169	1.293	1.102	1.073	1.058
Id.	0.0006507	1.299	1.380	1.302	1.289
Id.	0.0006559	1.304	1.386	1.306	1.294
Funk.	0.0007590	1 337	1.496	1.408	1.397
Bidone.	0.0007060	1.366	1.442	1.358	1.345
Funk.	0.0007749	1.417	1.513	1.423	1.415
Id.	0.0008000	1.450	1.542	1.440	1.436
Id.	0.0007575	1.467	1.494	1.407	1.391
Brünings.	0.0008374	1.474	1.575	1.481	1.471
Funk.	0.0009422	1.490	1.675	1.572	1.564
Id.	0.0007182	1.502	1.411	1.369	1.357
Id.	0.0008508	1 506	1.588	1.493	1.483
Id.	0.0011335	1.509	1.844	1.728	1.723
Id.	0.0009568	1.575	1.682	1.585	1.577
Bidone.	0.0009343	1.586	1.663	1.566	1.557
Funk.	0.0009181	1.597	1.052	1.552	1.543
Id.	0.0010230	1.600	1.442	1.640	1.633
Id.	0.0009481	1.608	1.680	1.576	1.569
Id.	0.0012445	1.626	1.935	1.812	1.810
Id.	0.0009631	1.663	1.694	1.590	1.582
Bidone.	0.0010849	1.692	1.802	1.690	1.684
Funk.	0.0010745	1.735	1.793	1.681	1.676
Id.	0.0011647	1.757	1.870	1.752	1.748
Id.	0.0012489	1.820	1.938	1.815	1.813
Id.	0.0013210	1.869	1 996	1.868	1.866
Id.	0.0014980	1.919	2.130	1.991	1.994
Id.	0.0015613	1.993	2.176	2.034	2.038
Id.	0.0016040	2.008	2.206	2.062	2.067
Id.	0 0016297	2.035	2.224	2.078	2.084
Id.	0.0015700	2.040	2.182	2.039	2.043
Id.	0.0016393	2.101	2.232	2.085	2.091
Id.	0.0017309	2.119	2.205	2.141	2.151
Id.	0.0019626	2.294	2.442	2.284	2.298
Id.	0.0022389	2.409	2.611	2.442	2.462
Id.	0.0021642	2.416	2.574	2.400	2.418

158. ***Relation entre la vitesse moyenne, la vitesse maxima à la surface et à la vitesse au fond d'un cours d'eau.*** **Des expériences de Dubuat (157), de Prony a conclu la formule**

$$\frac{v}{V}=\frac{V+2.37}{V+3.15}. \qquad (a)$$

v vitesse moyenne (157);
V vitesse à la surface, prise au point où se trouve le fil de l'eau, c'est-à-dire, au point où elle est la plus grande; cette vitesse maxima correspond généralement à la plus grande profondeur de l'eau.

De cette formule on conclut que, pour les valeurs de V :

0m,10, 0m,50, 1m,00, 1m,50, 2m,00, 2m,50, 3m,00, 3m,50, 4m,00,

on a respectivement $\frac{v}{V}=$

0,760, 0,786, 0,812, 0,832, 0,848, 0,862, 0,873, 0,883, 0,891.

En pratique, pour des vitesses à la surface comprises entre 0m,20 et 1m,50, on peut supposer $v=\frac{4}{5}V=0{,}8V$, ou $V=1{,}25v$.

La formule précédente donne pour v des valeurs trop considérables lorsqu'il s'agit de grands cours d'eau; ainsi des expériences directes faites sur la Seine ont donné $v=0{,}62V$, et d'autres faites par M. Raucourt sur la Newa ont fourni $v=0{,}75V$.

Le filet doué de la vitesse moyenne a été habituellement trouvé un peu au-dessous de la moitié, vers les 3/5, de la profondeur.

Des ingénieurs allemands ont trouvé que le rapport entre la vitesse moyenne de tous les filets rencontrés par une même verticale et la vitesse à la partie supérieure de la verticale, variait de 0,88 à 0,90; des expériences faites sur le Rhin, par M. Defontaine, ont donné moyennement 0,88 pour ce rapport.

Dubuat a conclu de ses expériences (157), que l'on avait, en représentant par U la vitesse au fond d'un canal,

$$U=2v-V, \qquad (b)$$

d'où on tire, en faisant $V=1{,}25v$,

$$U=0{,}75v, \quad \text{ou} \quad v=1{,}33U.$$

Pour l'établissement d'un canal, on se donnera la vitesse U, telle que les parois ne soient pas dégradées; on en conclura la vitesse moyenne v qu'il ne faudra pas dépasser, et, à l'aide de l'une des formules du nº 157, on déterminera les quantités qui sont encore inconnues.

TABLEAU des valeurs maximum de U *pour différentes natures de sols.*

	m.
Terres détrempées, brunes	0,076
Argiles tendres	0,152
Sables	0,305
Graviers	0,609
Cailloux	0,614
Pierres cassées, silex	1,220
Cailloux agglomérés ou poudings, schistes tendres	1,520
Roches en couches	1,830
Roches dures	3,050

159. *Jaugeage des rivières.* La formule de Prony

$$v = \sqrt{0,005\,163 + 3\,233,428RI} - 0,071\,85,$$

ou simplement.

$$v = 56,86\sqrt{RI} - 0,072, \qquad (157)$$

peut servir à jauger non-seulement un cours d'eau à section constante et à pente uniforme sur toute sa longueur, mais aussi un cours d'eau quelconque, pourvu que l'on puisse trouver sur son parcours une certaine longueur, 400 mètres si c'est possible, dont la section soit constante et la pente uniforme. Un profil en travers donne la section transversale du cours d'eau et le périmètre mouillé, et divisant la section par le périmètre on a le rayon moyen R ; un nivellement donne la pente totale de la partie régulière du cours d'eau, et cette pente, divisée par la longueur du développement de l'axe de cette partie régulière, donne la pente I par mètre. Substituant R et I dans la formule précédente, on en conclut la vitesse v, laquelle, multipliée par la section transversale fournie par le profil, donne la dépense.

Si la section du cours d'eau n'est pas tout à fait constante, ce qui arrive souvent pour les cours d'eau naturels, sur la longueur à peu près régulière considérée, on fait un certain nombre de profils en travers du cours d'eau, ce qui donne le même nombre de sections, dont on prend la moyenne en divisant leur somme par leur nombre ; on prend également la moyenne des périmètres mouillés, aussi donnés par les profils, et divisant la section moyenne par le périmètre moyen, on a le rayon moyen R. On détermine ensuite la pente I, puis la vitesse moyenne v et la dépense comme dans le cas précédent.

Si le profil en travers d'un cours d'eau présentait une grande profondeur sur une certaine étendue, et s'étendait loin avec une très-faible profondeur, pour appliquer la formule de Prony, il conviendrait de considérer le cours d'eau comme formé de deux, l'un correspondant à la partie profonde, et l'autre à la partie de faible profondeur ; par là, chaque

profil partiel serait convexe, et on rentrerait dans les cas qui ont servi à l'établissement de la formule de Prony.

On peut encore jauger une rivière en déterminant directement la vitesse maxima à la surface. On jette dans le fil de l'eau un flotteur cylindrique en bois de chêne, qui s'immerge presque complétement; on compte, à l'aide d'une montre à secondes, le temps que met le flotteur pour parcourir une certaine distance, que l'on a encore eu soin de prendre la plus grande possible et au point où le cours d'eau est le plus régulier, et divisant l'espace par le temps, on a la vitesse. On a soin de répéter une dizaine de fois l'expérience, et en prenant la moyenne des vitesses trouvées pour toutes les expériences, on obtient une vitesse que l'on peut considérer comme étant la vitesse à la surface, laquelle, multipliée par 0,8 donne la vitesse moyenne (158). On détermine ensuite la section du cours d'eau par un simple profil, si la partie parcourue par le flotteur a partout la même section, ou par un certain nombre, comme il a déjà été indiqué dans ce numéro, si la section n'est pas tout à fait constante, et la vitesse moyenne, multipliée par la section, donne la dépense. On a soin de jeter le flotteur dans le courant un peu au-dessus du point duquel on commence à compter le temps, afin que quand il arrive à ce point, il possède déjà la vitesse du courant. Au lieu d'un seul flotteur, on peut en jeter plusieurs à la fois dans le courant; mais il convient encore, malgré cela, de répéter un certain nombre de fois l'expérience.

Il est évident qu'au lieu d'employer la formule de Prony pour jauger un cours d'eau, on peut faire usage de celle d'Eytelwein ou de celle de M. de Saint-Venant (157).

160. *Considérations sur le mouvement uniforme des eaux courantes.* (Extrait des études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux courantes, par M. Dupuit, ingénieur en chef des ponts et chaussées.)

Le mouvement d'un fluide dans un canal donne lieu à deux résistances : l'adhérence du fluide aux parois du canal, la cohésion des molécules entre elles.

Ces deux résistances ont pour propriétés communes : d'être proportionnelles aux surfaces en contact, d'être indépendantes de la pression, de croître pour l'adhérence avec la vitesse absolue, pour la cohésion avec le rapport entre la vitesse relative des couches et leur épaisseur.

Ces propriétés, que mettent en évidence les expériences les plus simples, distinguent complétement ces deux résistances du frottement des solides sur les solides, qui ne dépend ni de la vitesse ni de la superficie du contact, et croît au contraire avec la pression (58). Cependant l'adhérence du liquide au solide est une force de même ordre que le frottement ordinaire et lui est comparable; on pourrait déterminer l'épaisseur d'une feuille de tôle qui éprouverait en glissant sur une surface solide la même résistance qu'y rencontrerait une couche d'eau de

même surface. Quant à la cohésion des molécules entre elles, c'est une espèce d'affinité chimique d'un ordre complétement différent, et qui agit avec une intensité incomparablement plus grande que l'adhérence. C'est là une distinction essentielle qu'on ne trouve établie dans aucun traité d'hydrodynamique.

Il y a de nouvelles expériences à faire pour attribuer à l'adhésion et à la cohésion leur part dans les phénomènes où elles agissent avec des intensités diverses; pour établir, au lieu des formules empiriques dont on se sert aujourd'hui, des formules rationnelles fondées sur les propriétés réelles de ces deux résistances si distinctes.

M. Dupuit prouve théoriquement que la formule (*b*), n° 158, vérifie le phénomène, du moins avec une approximation suffisante pour la pratique.

Dans le cas d'une section rectangulaire d'une largeur indéfinie, cette formule est

$$v=\frac{2V+U}{3}, \qquad (1)$$

formule qui donne pour v une valeur qui ne diffère de celle donnée par (*b*) que de la quantité $\frac{1}{6}(V-U)$, et cette différence ne tient qu'au cas particulier du rectangle de largeur indéfinie, ou de parois latérales sans frottement.

La formule (*a*), n° 158, au contraire, ne vérifie pas le phénomène. De la formule précédente on conclut

$$\frac{v}{V}=0,67+\frac{1}{3}\frac{U}{V}.$$

Ce qui fait voir que le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse de la surface est toujours compris entre 0,67 et 1. Dans le plus grand nombre de cas, U étant environ la moitié de la vitesse à la surface, ce rapport s'écarte peu de 0,80, coefficient ordinairement employé. Ce n'est que sur ce seul point qu'il y a accord avec les expériences de Dubuat.

La formule précédente peut se mettre sous la forme

$$\frac{v}{V}=0,67+\frac{1}{3}\frac{1}{1+CHU}=0,67+\frac{1}{3}\frac{1}{1+CH^{\frac{3}{2}}I^{\frac{1}{2}}}.$$

C constante;
H profondeur du canal;
I pente par mètre.

Ainsi le rapport $\frac{v}{V}$ diminue quand la vitesse du fond et la profondeur

du canal augmentent; il est constant lorsque le produit $H^{\frac{3}{2}}I^{\frac{1}{2}}$ ou HU est lui-même constant; ce qui explique comment, dans certaines circonstances, l'expérience a pu vérifier la loi de Dubuat, qui suppose ce rapport indépendant de U (*Int.* 429).

D'après ce qui précède, M. Dupuit fait remarquer que la vitesse U étant donnée par une équation de la forme

$$HI = aU + bU^2, \quad (2)$$

on aura les vitesses v et V par les formules

$$v = U + \frac{H^2 I}{3\varepsilon}, \quad (3)$$

et

$$V = U + \frac{H^2 I}{2\varepsilon}, \quad (4)$$

ε étant un coefficient.

Ce qui résout le problème d'une manière complète pour la pratique, car on peut déterminer une quelconque des quantités U, v, V, H, I en fonction des deux autres.

La profondeur à laquelle a lieu la vitesse moyenne est

$$z = \frac{1}{3} H \sqrt{3} = 0.58\ H. \quad (5)$$

C'est ce que vérifie l'expérience (158).

Pour un tuyau cylindrique, les formules (1), (2), (3), (4), (5) deviennent respectivement :

$$v = \frac{U + V}{2},$$

$$\frac{1}{2} RI = aU + bU^2,$$

$$v = U + \frac{R^2 I}{8\varepsilon},$$

$$V = U + \frac{R^2 I}{4\varepsilon},$$

$$\rho = \frac{1}{2} R \sqrt{2} = 0.70\ R.$$

R rayon du tuyau;
ρ rayon de la couche fluide cylindrique qui possède la vitesse moyenne v;

Ces équations s'appliquant à un demi-cylindre comme à un tuyau entier, on pourrait observer à la surface la variation des vitesses à partir du centre, ce qui est plus facile que dans l'intérieur du liquide.

Pour un canal rectangulaire d'une largeur limitée, en appelant :

- V la vitesse au milieu de la surface du canal;
- U la vitesse au milieu du fond du canal;
- V_1 et U_1 les vitesses en haut et en bas des parois verticales;
- H la profondeur uniforme de l'eau;
- L la demi-largeur du canal;
- w la vitesse variable des filets contigus au fond du canal;
- w_1 la vitesse variable des filets contigus à la paroi verticale;
- v_1 la vitesse d'un filet situé à la profondeur z et à la distance y du milieu du canal.

on a d'abord les trois équations de condition

$$I = 2\varepsilon\frac{V-U}{H^2} + 2\varepsilon\frac{V-V_1}{L^2}, \qquad (1')$$

$$\int_0^L (aw + bw^2)\,dy = 2\varepsilon\frac{V-U}{H}L, \qquad (2')$$

$$\int_0^H (aw_1 + bw_1^2)\,dz = 2\varepsilon\frac{V-V_1}{L}H, \qquad (3')$$

qui permettront de calculer V, V_1, U, qui sont les seules quantités inconnues qui entrent dans la valeur de

$$v_1 = V - \frac{V-U}{H^2}z^2 - \frac{V-V_1}{L^2}y^2. \qquad (a)$$

Les variables w et w_1 s'exprimeraient en y et en z, en faisant successivement $y=L$ et $z=H$ dans cette dernière formule, ce qui donnerait

$$w = U - \frac{V-V_1}{L^2}y^2 \text{ et } w_1 = V_1 - \frac{V-U}{H^2}z^2.$$

Pour $z=H$ et $y=L$, la formule (a) donne

$$v_1 = U_1 = U + V_1 - V.$$

La vitesse moyenne est donnée par l'équation

$$v = \frac{V+V_1+U}{3} = \frac{2V+U_1}{3} = \frac{2(V_1+U)-U_1}{3}.$$

Pour $H=L$, ce qui arrive pour un tuyau ou pour un canal ouvert dont la profondeur est la moitié de la largeur, on a

$$V_1 = U \text{ et } V - U = \frac{H^2I}{4\varepsilon}.$$

La vitesse moyenne est alors

$$v = \frac{V + 2U}{3}.$$

De l'équation (1') on tire le coefficient

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{2} L^2 H^2 I}{(V - U)L^2 + (V - V_1)H^2}, \text{ et pour } H = L, \ \varepsilon = \frac{H^2 I}{4(V - U)}.$$

Supposant la résistance à la paroi proportionnelle à la vitesse moyenne sur cette paroi, ce qui fournit une approximation plus que suffisante pour la pratique, les 3 équations de condition (1') (2') (3') se simplifient et deviennent :

$$\frac{V - U}{H^2} + \frac{V - V_1}{L^2} = \frac{I}{2\varepsilon}, \qquad (1'')$$

$$E\left(V_1 - \frac{V - U}{3}\right) = 2\varepsilon \frac{V - V_1}{L}, \qquad (2'')$$

$$E\left(U - \frac{V - V_1}{3}\right) = 2\varepsilon \frac{V - U}{H}. \qquad (3'')$$

Équations du premier degré en V, V_1 et U, qui serviront à calculer ces 3 quantités. Dans ces équations, en négligeant a, ce qui est presque toujours permis, on a

$$E = \sqrt{\frac{bLHI}{L + H}}.$$

Telles sont les formules qu'il faudrait appliquer dans le cas des canaux d'expérience, dont la hauteur et la largeur ne diffèrent pas beaucoup.

Si le canal avait une largeur très-considérable par rapport à la hauteur, on appliquerait les formules du rectangle à largeur indéfinie, dans lesquelles on remplacerait I par $I\frac{L}{L + H}$. Ainsi l'effet de la paroi latérale se réduit à diminuer l'inclinaison dans le rapport de L à L + H.

Pour une section trapézoïdale, il convient de substituer aux parois inclinées des parois verticales menées par le milieu des premières, de manière à ne pas changer la section du canal.

Pour une section quelconque, jusqu'à de nouvelles expériences, M. Dupuit conseille les méthodes et les chiffres suivants, comme les plus propres à donner un résultat exact dans les problèmes relatifs au mouvement uniforme.

Une section étant donnée, il faut d'abord, si cela est nécessaire, la diviser en autant de parties qu'il y a de vitesses sensiblement différentes

à la paroi, et appliquer à chacune de ces parties le procédé de calcul suivant.

On supposera à a et b les valeurs données par de Prony pour les tuyaux de conduite, en les augmentant un peu (161), et on déterminera la vitesse à la paroi à l'aide de la formule

$$RI = aU + bU^2 = 0.000\,018U + 0.000\,36U^2.$$

Pour avoir la vitesse moyenne, on posera, suivant que la section affectera la forme circulaire, ou rectangulaire dans laquelle on peut négliger l'influence des parois verticales, ou rectangulaire large par rapport à la hauteur

$$v = U + \frac{1}{8\varepsilon} R^2 I, \quad v = U + \frac{1}{4\varepsilon} H^2 I, \quad v = U + \frac{1}{4\varepsilon} \frac{L}{L+H} H^2 I.$$

Il ne reste donc qu'à donner une valeur au coefficient ε pour en déduire un résultat numérique. M. Sonnet propose, d'après des expériences de Couplet, de prendre $\frac{1}{\varepsilon} = 3\,200$; mais ces expériences ayant été faites dans des tuyaux de petit diamètre, elles sont peu propres à déterminer ce coefficient pour les grands cours d'eau, pour lesquels la valeur $\varepsilon = \frac{1}{3\,200}$ paraît beaucoup trop faible. Ce n'est que dans les grandes sections, et par conséquent dans les canaux découverts et dans les fortes pentes, qu'il importe d'introduire dans les formules les considérations qui précèdent; elles sont sans importance dans les cas contraires. Ce n'est aussi que par des observations faites sur ces sections qu'on parviendra à déterminer la valeur de ε.

TUYAUX DE CONDUITE DES EAUX.

161. Outre la formule relative à l'établissement des canaux à ciel découvert (157), de Prony, de la discussion de 51 expériences de Dubuat, Bossut, Couplet, a encore conclu une formule analogue pour le cas d'une conduite cylindrique régulière dans laquelle le régime des eaux est établi; cette formule est

$$\frac{DJ}{4} = av + bv^2 = 0.000\,017\,3v + 0.000\,348v^2,$$

de laquelle on tire (*Int.*, 438)

$$v = \sqrt{0.006\,2 \times 2\,871.44 \frac{DJ}{4}} - 0.025,$$

ou à peu près

$$v = 53.58 \sqrt{\frac{DJ}{4}} - 0.025.$$

v vitesse moyenne de régime;
D diamètre intérieur de la conduite;
J pente par mètre, ou différence de niveau de l'eau aux deux extrémités de la conduite divisée par la longueur totale de la conduite;
a coefficient égal à 0,000 017 331 4 d'après de Prony, et à 0,000 022 36 d'après Eytelwein;
b coefficient égal à 0,000 348 259 0 d'après de Prony, et à 0,000 280 32 d'après Eytelwein.

Ayant v, on a la dépense

$$Q = Sv = \frac{\pi D^2}{4} v. \qquad (Int., 605.)$$

M. de Saint-Venant, de la discussion des résultats qui ont servi à de Prony et Eytelwein pour établir leur formule, a conclu la formule monome (mémoire cité page 112)

$$\frac{DJ}{4} = 0,000\,295\,57\, v^{\frac{12}{7}}, \quad \text{d'où} \quad v = 114,494 \left(\frac{DJ}{4}\right)^{\frac{7}{12}}.$$

v et D ont les mêmes significations que ci-dessus. Quant à J, il en a une un peu différente, qui avait été admise par Dubuat et ensuite par Eytelwein.

La *hauteur de charge*, dit Dubuat (Principes d'hydraulique), est une force motrice qui peut être considérée comme divisée en deux parties, l'une *employée à imprimer la vitesse*, l'autre à vaincre la résistance qui naît du mouvement dans toute la longueur du tuyau.

La première de ces deux parties de la charge serait $\frac{v^2}{2g}$ s'il n'y avait pas de contraction à la jonction du tuyau avec le réservoir; mais comme dans les expériences l'entrée du tuyau n'était pas évasée, Dubuat prend $\frac{v^2}{\mu^2 . 2g}$ pour la portion surmontant la *résistance d'inertie* du fluide, portion dont la partie $\left(\frac{1}{\mu^2} - 1\right)\frac{v^2}{2g}$ est consommée à engendrer les tourbillonnements, suite inévitable de l'épanouissement rapide de la veine après sa contraction. C'est le surplus

$$Z - \frac{v^2}{2\mu^2 g}$$

qui, divisé par la longueur L du tuyau, donne à Dubuat la *pente fic-*

tive J, qui, multipliée par le poids du fluide de l'unité de longueur du tuyau, donne la force faisant équilibre à la résistance des parois dans la même étendue

Z pente totale ou différence de niveau de l'eau aux deux extrémités de la conduite;

$\frac{1}{\mu^2} = 1{,}55$, ou environ $\mu = 0{,}80$, d'après des expériences de Bossut, où le tuyau était soudé à un réservoir en fer-blanc dont l'orifice devait être à vive arête;

$\frac{1}{\mu^2} = 1{,}35$, ou environ $\mu = 0{,}86$, d'après les expériences de Dubuat, où le tuyau partait d'une caisse en bois dont l'orifice avait apparemment des arêtes un peu arrondies ou formait comme un léger évasement à l'entrée de l'eau.

C'est en adoptant la valeur de J de Dubuat que M. de Saint-Venant est parvenu, comme pour les canaux (157), à représenter le mouvement de l'eau dans les tuyaux à l'aide de la formule

$$\frac{\pi D^2}{4} \frac{Z - \frac{v^2}{2\mu^2 g}}{L} = \pi D \times cv^m$$

$$\text{ou} \quad \frac{DJ}{4} = cv^m = 0.000\,295\,57\, v^{\frac{11}{7}}$$

C'est afin d'abréger les calculs relatifs à la conduite des eaux, soit à ciel découvert, soit au moyen de tuyaux, que de Prony a calculé le tableau suivant, qui satisfait aux cas ordinaires de la pratique. Ce tableau contient en outre les valeurs de RI données par la formule d'Eytelwein (157). C'est dans le même but que M. de Saint-Venant a calculé les valeurs de RI et celle de $\frac{DJ}{4}$ que nous reproduisons au tableau de la page 127.

VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.	VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.
	EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.		EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.
m				m			
0.01	0.000 000 3	0.000 000 5	0.000 000 2	0.51	0.000 107 5	0.000 103 1	0.000 099 4
0.02	0.000 000 6	0.000 001 0	0.000 000 5	0.52	0.000 111 5	0.000 106 8	0.000 103 2
0.03	0.000 001 1	0.000 001 6	0.000 000 8	0.53	0.000 115 5	0.000 110 4	0.000 107 0
0.04	0.000 001 6	0.000 002 3	0.000 001 3	0.54	0.000 119 7	0.000 114 2	0.000 110 9
0.05	0.000 002 1	0.000 003 0	0.000 001 7	0.55	0.000 123 0	0.000 118 0	0.000 114 9
0.06	0.000 002 8	0.000 003 8	0.000 002 3	0.56	0.000 128 2	0.000 121 9	0.000 118 9
0.07	0.000 003 5	0.000 004 6	0.000 002 9	0.57	0.000 132 6	0.000 125 8	0.000 123 0
0.08	0.000 004 3	0.000 005 5	0.000 003 6	0.58	0.000 137 0	0.000 129 8	0.000 127 2
0.09	0.000 005 1	0.000 006 5	0.000 004 4	0.59	0.000 141 6	0.000 133 9	0.000 131 5
0.10	0.000 006 0	0.000 007 5	0.000 005 2	0.60	0.000 146 1	0.000 138 0	0.000 135 8
0.11	0.000 007 1	0.000 008 6	0.000 006 1	0.61	0.000 150 8	0.000 142 2	0.000 140 2
0.12	0.000 008 2	0.000 009 8	0.000 007 1	0.62	0.000 155 6	0.000 146 5	0.000 144 6
0.13	0.000 009 3	0.000 011 0	0.000 008 1	0.63	0.000 160 4	0.000 150 8	0.000 149 1
0.14	0.000 010 6	0.000 012 3	0.000 009 3	0.64	0.000 105 3	0.000 155 1	0.000 153 7
0.15	0.000 011 9	0.000 013 6	0.000 010 4	0.65	0.000 170 2	0.000 159 6	0.000 158 4
0.16	0.000 013 2	0.000 015 0	0.000 011 7	0.66	0.000 175 3	0.000 164 1	0.000 163 1
0.17	0.000 014 7	0.000 016 5	0.000 013 0	0.67	0.000 180 3	0.000 168 6	0.000 167 9
0.18	0.000 016 2	0.000 018 0	0.000 014 4	0.68	0.000 185 5	0.000 173 3	0.000 172 8
0.19	0.000 017 8	0.000 019 6	0.000 015 9	0.69	0.000 190 8	0.000 177 9	0.000 177 8
0.20	0.000 019 5	0.000 021 3	0.000 017 4	0.70	0.000 196 1	0.000 182 7	0.000 182 8
0.21	0.000 021 2	0.000 023 0	0.000 019 0	0.71	0.000 201 5	0.000 187 5	0.000 187 9
0.22	0.000 023 0	0.000 024 7	0.000 020 7	0.72	0.000 207 0	0.000 192 4	0.000 193 0
0.23	0.000 024 0	0.000 026 6	0.000 022 4	0.73	0.000 212 5	0.000 197 3	0.000 198 2
0.24	0.000 026 9	0.000 028 5	0.000 024 2	0.74	0.000 218 1	0.000 202 3	0.000 203 5
0.25	0.000 028 9	0.000 030 4	0.000 026 1	0.75	0.000 223 8	0.000 207 3	0.000 208 9
0.26	0.000 031 0	0.000 032 5	0.000 028 0	0.76	0.000 229 6	0.000 212 4	0.000 214 3
0.27	0.000 033 2	0.000 034 6	0.000 030 1	0.77	0.000 235 4	0.000 217 6	0.000 219 8
0.28	0.000 035 4	0.000 036 7	0.000 032 2	0.78	0.000 241 3	0.000 222 9	0.000 225 4
0.29	0.000 037 8	0.000 038 9	0.000 034 3	0.79	0.000 247 3	0.000 228 2	0.000 231 0
0.30	0.000 040 2	0.000 041 2	0.000 030 5	0.80	0.000 253 4	0.000 233 5	0.000 236 8
0.31	0.000 042 5	0.000 043 5	0.000 038 8	0.81	0.000 259 5	0.000 238 9	0.000 242 5
0.32	0.000 045 2	0.000 045 9	0.000 041 2	0.82	0.000 265 7	0.000 244 4	0.000 248 4
0.33	0.000 047 8	0.000 048 4	0.000 043 6	0.83	0.000 272 0	0.000 250 0	0.000 254 3
0.34	0.000 050 5	0.000 050 9	0.000 046 2	0.84	0.000 278 3	0.000 255 6	0.000 260 3
0.35	0.000 053 3	0.000 053 4	0.000 048 7	0.85	0.000 284 7	0.000 261 3	0.000 266 3
0.36	0.000 056 1	0.000 056 1	0.000 051 4	0.86	0.000 291 2	0.000 267 0	0.000 272 5
0.37	0.000 059 0	0.000 058 8	0.000 054 1	0.87	0.000 297 8	0.000 272 8	0.000 278 7
0.38	0.000 062 0	0.000 061 6	0.000 056 9	0.88	0.000 304 4	0.000 278 6	0.000 284 9
0.39	0.000 065 1	0.000 064 4	0.000 059 7	0.89	0.000 311 1	0.000 284 6	0.000 291 3
0.40	0.000 068 2	0.000 067 3	0.000 062 7	0.90	0.000 317 9	0.000 290 6	0.000 297 7
0.41	0.000 071 4	0.000 070 2	0.000 065 6	0.91	0.000 324 8	0.000 296 6	0.000 304 2
0.42	0.000 074 7	0.000 073 2	0.000 068 7	0.92	0.000 331 7	0.000 302 7	0.000 310 7
0.43	0.000 078 0	0.000 076 3	0.000 071 8	0.93	0.000 338 7	0.000 308 9	0.000 317 3
0.44	0.000 081 4	0.000 079 4	0.000 075 0	0.94	0.000 345 8	0.000 315 1	0.000 324 0
0.45	0.000 084 9	0.000 082 6	0.000 078 3	0.95	0.000 353 0	0.000 321 4	0.000 330 8
0.46	0.000 088 5	0.000 085 9	0.000 081 7	0.96	0.000 360 2	0.000 327 7	0.000 337 6
0.47	0.000 092 2	0.000 089 2	0.000 085 1	0.97	0.000 367 5	0.000 334 2	0.000 344 5
0.48	0.000 095 9	0.000 092 6	0.000 088 6	0.98	0.000 374 9	0.000 340 6	0.000 351 5
0.49	0.000 099 7	0.000 096 0	0.000 092 1	0.99	0.000 382 3	0.000 347 2	0.000 358 5
0.50	0.000 103 5	0.000 099 6	0.000 095 7	1.00	0.000 389 8	0.000 353 8	0.000 365 6

VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES			VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES		
	de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.		de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.
	EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.		EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.
m				m			
1.01	0.000 397 4	0.000 360 4	0.000 372 8	1.51	0.000 870 1	0.000 772 4	0.000 820 2
1.02	0.000 405 1	0.000 367 2	0.000 380 0	1.52	0.000 881 4	0.000 782 2	0.000 831 0
1.03	0.000 412 8	0.000 373 9	0.000 387 3	1.53	0.000 802 8	0.000 702 1	0.000 841 8
1.04	0.000 420 6	0.000 380 8	0.000 394 7	1.54	0.000 904 3	0.000 802 0	0.000 852 6
1.05	0.000 428 6	0.000 387 7	0.000 402 2	1.55	0.000 915 8	0.000 812 0	0.000 863 6
1.06	0.000 436 4	0.000 394 7	0.000 409 7	1.56	0.000 927 4	0.000 822 1	0.000 874 6
1.07	0.000 444 5	0.000 401 7	0.000 417 3	1.57	0.000 039 1	0.000 832 2	0.000 885 6
1.08	0.000 452 6	0.000 408 8	0.000 424 9	1.58	0.000 950 9	0.000 842 4	0.000 896 8
1.00	0.000 460 7	0.000 415 9	0.000 432 7	1.59	0.000 962 7	0.000 852 7	0.000 908 0
1.10	0.000 460 0	0.000 423 2	0.000 440 5	1.60	0.000 074 6	0.000 863 0	0.000 010 3
1.11	0.000 477 3	0.000 430 4	0.000 448 3	1.61	0.000 986 6	0.000 873 3	0.000 930 6
1.12	0.000 485 7	0.000 437 8	0.000 456 3	1.62	0.000 098 6	0.000 883 8	0.000 042 0
1.13	0.000 404 2	0.000 445 2	0.000 464 3	1.63	0.001 010 8	0.000 894 3	0.000 053 5
1.14	0.000 502 7	0.000 452 7	0.000 472 4	1.64	0.001 023 0	0.000 904 8	0.000 905 1
1.15	0.000 511 3	0.000 460 2	0.000 480 5	1.65	0.001 035 2	0.000 915 5	0 000 070 7
1.16	0.000 520 0	0.000 467 8	0.000 488 7	1.66	0.001 047 6	0.000 926 1	0 000 088 4
1.17	0.000 528 8	0.000 475 4	0.000 497 0	1.67	0.001 050 9	0.000 936 0	0.001 000 2
1.18	0.000 537 6	0.000 483 1	0.000 505 4	1.68	0.001 072 5	0.000 947 7	0.001 012 0
1.19	0.000 546 5	0.000 490 9	0.000 513 8	1.60	0.001 085 0	0.000 958 6	0.001 024 0
1.20	0.000 555 5	0.000 498 8	0.000 522 3	1.70	0.001 097 7	0.000 969 5	0.001 035 9
1.21	0.000 564 6	0.000 506 7	0.000 530 9	1.71	0.001 110 4	0.000 080 5	0.001 048 0
1.22	0.000 573 7	0.000 514 6	0.000 539 5	1.72	0.001 123 1	0.000 991 5	0.001 060 1
1.23	0.000 582 9	0.000 522 6	0.000 548 2	1.73	0.001 136 0	0.001 002 6	0 001 072 3
1.24	0.000 502 1	0.000 530 7	0.000 557 0	1.74	0.001 148 9	0.001 013 8	0.001 084 5
1.25	0.000 601 5	0.000 538 0	0.000 565 8	1.75	0.001 162 0	0.001 025 1	0.001 006 9
1.26	0.000 610 9	0.000 547 1	0.000 574 7	1.76	0.001 175 0	0.001 036 4	0.001 100 3
1.27	0.000 620 5	0.000 555 3	0.000 583 7	1.77	0.001 188 1	0.001 047 7	0.001 121 7
1.28	0.000 630 0	0.000 503 7	0.000 592 8	1.78	0.001 201 4	0.001 059 2	0.001 134 3
1.20	0.000 630 6	0.000 572 1	0.000 601 0	1.79	0.001 214 6	0.001 070 6	0.001 146 0
1.30	0.000 649 3	0.000 580 5	0.000 611 1	1.80	0.001 228 1	0.001 082 2	0.001 159 6
1 31	0.000 059 1	0.000 589 0	0.000 620 4	1.81	0.001 241 4	0.001 093 8	0.001 172 3
1.32	0.000 660 0	0.000 597 6	0.000 620 7	1.82	0.001 255 1	0.001 105 5	0.001 185 1
1.33	0.000 678 9	0.000 606 3	0.000 639 1	1.83	0.001 268 6	0.001 117 2	0.001 198 0
1.34	0.000 688 9	0.000 615 0	0.000 648 6	1.84	0.001 282 2	0.001 129 0	0.001 211 0
1.35	0.000 609 0	0.000 623 7	0.000 658 1	1.85	0.001 206 0	0.001 140 9	0.001 224 0
1.36	0.000 709 1	0.000 632 6	0.000 667 7	1.86	0.001 309 7	0.001 152 8	0.001 237 1
1.37	0.000 719 3	0.000 641 4	0.000 677 4	1.87	0.001 323 7	0.001 164 8	0.001 250 2
1.38	0.000 729 0	0.000 650 4	0.000 687 1	1.88	0.001 337 5	0.001 176 8	0.001 263 5
1.39	0.000 740 0	0.000 650 4	0.000 607 0	1 89	0.001 351 6	0.001 188 9	0.001 276 8
1.40	0.000 750 4	0.000 608 5	0.000 706 9	1.90	0.001 365 7	0.001 201 1	0.001 200 1
1.41	0.000 760 9	0.000 677 6	0.000 716 8	1.91	0.001 379 8	0.001 213 3	0.001 303 6
1.42	0.000 771 5	0.000 686 8	0.000 726 8	1.02	0.001 304 1	0.001 225 6	0.001 317 1
1.43	0.000 782 2	0.000 696 1	0.000 736 9	1.03	0.001 408 4	0.001 238 0	0.001 330 7
1.44	0.000 702 9	0.000 705 4	0.000 747 1	1.04	0.001 422 8	0.001 250 4	0 001 344 3
1.45	0.000 803 7	0.000 714 8	0.000 757 3	1.95	0.001 437 3	0.001 262 8	0.001 358 1
1.46	0.000 814 6	0.000 724 2	0.000 767 7	1.96	0.001 451 9	0.001 275 4	0.001 371 8
1.47	0.000 825 8	0.000 733 7	0 000 778 0	1.97	0.001 460 4	0.001 288 0	0.001 385 7
1.48	0.000 830 6	0.000 743 3	0.000 788 5	1.98	0.001 481 1	0 001 300 6	0.001 399 6
1.40	0.000 847 7	0.000 752 9	0.000 709 0	1.09	0.001 495 0	0.001 313 4	0.001 413 6
1.50	0.000 858 9	0.000 762 6	0.000 809 6	2.00	0.001 510 7	0.001 326 2	0.001 427 7

VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES			VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES		
	de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.		de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.
	Eytelwein.	de Prony.	de Prony.		Eytelwein.	de Prony.	de Prony.
m				m			
2.01	0.001 525 7	0.001 330 0	0.001 441 8	2.51	0.002 363 8	0.002 060 3	0.002 237 6
2.02	0.001 540 5	0.001 351 0	0.001 450 0	2.52	0.002 382 4	0.002 076 3	0.002 255 3
2.03	0.001 555 6	0.001 364 9	0.001 470 3	2.53	0.002 401 2	0.002 092 4	0.002 273 0
2.04	0.001 570 7	0.001 377 9	0.001 484 7	2.54	0.002 410 0	0.002 108 5	0.002 290 8
2.05	0.001 585 0	0.001 301 0	0.001 400 1	2.55	0.002 438 8	0.002 124 7	0.002 308 7
2.06	0.001 601 2	0 001 404 2	0.001 513 6	2.56	0.002 457 7	0.002 140 0	0.002 326 7
2.07	0.001 616 5	0.001 417 4	0.001 528 1	2.57	0.002 476 8	0.002 157 2	0.002 344 8
2.08	0.001 632 0	0.001 430 7	0.001 542 8	2.58	0.002 495 8	0.002 173 6	0.002 302 0
2.00	0.001 647 4	0.001 444 0	0.001 557 5	2.50	0.002 514 0	0.002 100 0	0.002 381 0
2.10	0.001 663 0	0.001 457 4	0.001 572 2	2.60	0.002 534 0	0.002 206 5	0.002 399 3
2.11	0.001 678 6	0.001 470 0	0.001 587 1	2.61	0.002 553 4	0.002 223 1	0.002 417 6
2.12	0.001 004 3	0.001 484 4	0.001 602 0	2.02	0.002 572 8	0.002 230 7	0.002 436 0
2.13	0.001 710 1	0.001 408 0	0.001 616 0	2.63	0.002 502 2	0.002 250 4	0.002 454 5
2.14	0.001 725 7	0.001 511 7	0.001 632 0	2.64	0.002 611 8	0.002 273 1	0.002 473 0
2.15	0.001 741 9	0.001 525 4	0.001 647 1	2.65	0.002 631 3	0.002 290 0	0 002 401 6
2.16	0.001 757 0	0.001 530 2	0.001 602 3	2.66	0.002 650 0	0.002 306 8	0.002 510 2
2.17	0.001 774 0	0.001 553 0	0.001 677 5	2.67	0.002 670 7	0.002 323 8	0.002 529 0
2.18	0.001 790 1	0.001 560 0	0.001 092 8	2.08	0.002 090 5	0.002 340 7	0.002 547 8
2.10	0.001 806 3	0.001 580 9	0.001 708 2	2.60	0.002 710 4	0.002 357 8	0.002 506 7
2.20	0.001 822 6	0.001 594 0	0.001 723 7	2.70	0.002 730 3	0.002 374 0	0.002 585 0
2.21	0.001 838 9	0.001 609 0	0.001 730 2	2.71	0.002 750 4	0.002 302 1	0.002 604 6
2.22	0.001 855 4	0.001 623 1	0.001 754 8	2.72	0.002 770 4	0.002 400 3	0.002 623 7
2.23	0.001 871 0	0.001 637 3	0.001 770 5	2.73	0.002 790 6	0.002 426 6	0.002 642 0
2.24	0.001 888 5	0.001 651 6	0.001 786 2	2.74	0.002 810 8	0.002 444 0	0.002 662 1
.25	0.001 905 2	0.001 665 0	0.001 802 1	2.75	0 002 831 1	0.002 461 4	0.002 681 4
.26	0.001 021 8	0.001 680 3	0.001 817 9	2.76	0.002 851 5	0.002 478 0	0.002 700 7
.27	0.001 038 7	0.001 604 8	0.001 833 0	2.77	0.002 872 0	0.002 496 5	0.002 720 2
.28	0.001 055 5	0.001 709 3	0.001 840 0	2.78	0.002 802 5	0.002 514 1	0.002 730 7
.20	0.001 072 5	0.001 723 9	0.001 866 0	2.79	0.002 013 1	0 002 531 8	0.002 759 2
.30	0.001 989 5	0.001 738 5	0.001 882 2	2.80	0.002 033 8	0.002 540 5	0.002 778 0
.31	0.002 000 7	0.001 753 2	0.001 898 4	2.81	0.002 034 5	0.002 567 3	0.002 708 6
.32	0.002 023 8	0.001 768 0	0.001 014 7	2.82	0.002 075 4	0.002 585 1	0.002 818 4
.33	0.002 041 0	0.001 782 8	0.001 031 0	2.83	0.002 006 3	0.002 603 1	0.002 838 2
.34	0.002 058 4	0.001 797 7	0.001 047 5	2.84	0.003 017 2	0.002 621 0	0.002 858 1
.35	0.002 075 7	0.001 812 0	0.001 964 0	2.85	0.003 038 3	0.002 630 1	0.002 878 1
.36	0.002 003 2	0.001 827 7	0.001 080 6	2.86	0.003 039 4	0.002 657 2	0.002 898 2
.37	0.002 110 7	0.001 842 7	0.001 007 2	2.87	0.003 080 6	0.002 675 4	0.002 918 3
.38	0.002 128 4	0.001 857 9	0.002 013 0	2.88	0.003 101 8	0.002 603 6	0.002 938 5
.30	0.002 146 0	0.001 873 1	0.002 030 7	2.89	0.003 123 2	0.002 711 9	0.002 058 8
.40	0.002 163 7	0.001 888 3	0.002 047 6	2.90	0.003 144 6	0.002 730 2	0.002 970 1
41	0.002 181 6	0.001 003 7	0.002 064 5	2.01	0.003 166 1	0.002 748 7	0.002 009 5
42	0.002 190 5	0.001 010 0	0.002 081 5	2.02	0.003 187 6	0.002 707 1	0.003 020 0
43	0.002 217 5	0.001 934 5	0.002 098 5	2.03	0.003 209 2	0.002 785 7	0.003 040 5
44	0.002 235 5	0.001 050 0	0.002 115 7	2.04	0.003 230 0	0.002 804 3	0.003 061 2
45	0.002 253 6	0.001 065 6	0 002 132 0	2.05	0.003 252 7	0.002 822 0	0.003 081 0
40	0.002 271 8	0.001 981 2	0.002 130 2	2.00	0.003 274 5	0.002 841 7	0.003 102 0
47	0.002 200 0	0.001 986 0	0.002 107 5	2.97	0.003 200 5	0.002 860 5	0.003 123 4
48	0.002 308 4	0.002 012 0	0.002 184 0	2.98	0.003 318 5	0.002 879 3	0.003 144 3
.40	0.002 326 8	0.002 028 5	0.002 202 4	2.99	0.003 340 5	0.002 898 2	0.003 105 3
50	0.002 345 3	0.002 044 3	0.002 219 9	3.00	0.003 302 7	0.002 017 2	0.003 186 3

TABLE des valeurs de $RI = 0.099\,401\,02\,v^{\frac{21}{11}}$ *dans les canaux et de* $\frac{DJ}{4} = 0.000\,295\,57\,v^{\frac{13}{7}}$ *dans les tuyaux, d'après M. de Saint-Venant.*

VITESSE	VALEURS CORRESPONDANTES		VITESSE	VALEURS CORRESPONDANTES	
moyenne v.	de RI.	de $\frac{DJ}{4}$.	moyenne v.	de RI.	de $\frac{DJ}{4}$.
m			m		
0.04	»	0.000 091 19	0.51	0.000 119 89	0.000 093 19
0.05	»	0.000 001 74	0.52	0.000 115 08	0.000 096 34
0.06	»	0.000 002 38	0.53	0.000 119 34	0.000 099 54
0.07	»	0.000 093 10	0.54	0.000 123 67	0.000 102 78
0.98	»	0.000 003 89	9.55	0.000 128 08	0.000 106 06
0.09	»	0.000 004 76	0.56	0.000 132 57	0.000 109 39
0.10	0.000 904 94	0.000 005 71	0.57	0.000 137 13	0.900 112 76
0.11	0.000 005 93	0.000 006 72	0.58	0.000 141 76	0.000 116 17
0.12	0 000 007 00	0.000 007 80	0.59	0.000 146 46	0.900 119 63
0.13	0.000 008 16	0.000 008 95	9.60	0.000 151 23	0.000 123 13
0.14	0.000 009 40	0.000 010 16	9.61	0.000 156 08	0.600 126 67
0.15	0.000 910 72	0.000 011 43	0.62	0.000 161 00	0.000 130 25
0.16	0.000 912 13	0.000 012 77	0.63	0.000 165 99	0 000 133 87
0.17	0.000 013 62	0.000 014 17	0.64	0.000 171 06	0.000 137 53
0.18	0.000 015 19	0.000 015 63	0.65	0 000 176 20	0.000 141 23
0.19	0.000 016 84	0.000 017 15	0.66	0.000 181 41	0.000 144 97
0.20	0.000 018 57	0.000 018 72	9.67	0.000 186 69	0.000 148 76
0.21	0.000 020 38	0.000 029 36	0.68	0.000 192 95	0.000 152 59
0.22	0.000 022 27	0.000 022 05	0.69	0.000 197 48	0.000 156 46
0.23	0.000 024 25	0.000 023 80	9.70	0.000 202 98	0.000 160 37
0.24	0.000 026 30	0.000 025 60	0.71	0.000 208 55	0.000 164 31
0.25	0.000 028 43	0.000 027 45	0.72	0.000 214 19	0.000 168 30
0.26	0.000 930 64	0.000 029 36	0.73	0.000 219 90	0.000 172 33
0.27	0.000 032 93	0.000 031 32	0.74	0.000 225 69	0.000 176 40
0.28	0.000 035 30	0.000 033 33	0.75	0.000 231 55	0.000 180 50
0.29	0.000 037 74	0.000 035 40	0.76	0.000 237 48	0.000 184 65
0.30	0.000 940 27	0.000 037 52	0.77	0.000 243 48	0.000 188 83
0.31	0.000 942 87	0.000 039 69	0.78	0.000 249 55	0.000 193 06
0.32	0.000 045 55	0.000 041 91	0.79	0.000 255 70	0.000 197 32
0.33	0.000 048 30	0.000 044 18	0.80	0.000 261 92	0.000 291 62
0.34	0.000 051 14	0.000 046 50	9.81	0.000 268 21	0.000 295 96
0.35	0.000 054 05	0.000 048 87	0.82	0.000 274 56	0.000 210 34
0.36	0.000 057 03	0.000 051 29	0.83	0.000 280 98	0.000 214 75
0.37	0.000 060 09	0.000 053 76	9.84	0.000 287 48	0.000 219 21
0.38	0.000 063 23	0.000 056 27	0.85	0.000 294 05	0.000 223 70
0.39	0.000 066 45	0.000 058 83	0.86	0.000 300 69	0.000 228 23
0.40	0.000 069 74	0.000 061 44	0.87	0.000 397 40	0.000 232 80
0.41	0.000 973 10	0.000 064 10	0.88	0.000 314 18	0.000 237 41
0.42	0.000 076 55	0.000 066 81	0.89	0.000 321 93	0.000 242 05
0.43	0.000 080 07	0.000 069 56	0 90	0.000 327 95	0.000 246 73
0.44	0.000 083 65	0.000 072 35	0.91	0.000 334 94	0.000 251 45
0.45	0.000 087 32	0.000 075 19	0.92	0.000 342 01	0.000 256 20
0.46	0.000 091 06	0.000 078 08	0.93	0.000 349 13	0.000 260 99
0.47	0.000 094 88	0.000 081 01	0.94	0.000 356 34	0.000 265 82
0.48	0.000 098 77	0.000 083 99	0.95	0.000 363 61	0.000 270 69
0.49	0.000 102 74	0.000 087 01	0.96	0.000 370 95	0.000 275 59
0.50	0.000 106 78	0.000 090 08	0.97	0.000 378 36	0.000 280 53

VITESSE	VALEURS CORRESPONDANTES		VITESSE	VALEURS CORRESPONDANTES	
moyenne v.	de RI.	de $\frac{DJ}{4}$.	moyenne v.	de RI.	de $\frac{DJ}{4}$.
m			m		
0.08	0.000 385 85	0.000 285 51	1.51	0.000 880 8	0.000 599 1
0.00	0.000 393 41	0.000 290 52	1.52	0.000 801 0	0.000 605 0
1.00	0.000 401 03	0.000 295 57	1.53	0.000 003 1	0.000 612 7
1.01	0.000 [illegible]08 7	0.000 300 7	1.54	0.000 014 4	0.000 610 6
1.02	0.000 410 5	0 000 305 8	1.55	0.000 025 8	0.000 626 5
1.03	0 000 424 3	0.000 310 9	1.56	0.000 037 2	0.000 633 5
1.04	0.000 432 2	0.000 310 1	1.57	0.000 948 8	0.000 640 5
1.05	0.000 440 2	0.000 321 3	1.58	0.000 960 4	0.000 647 5
1.06	0.000 448 2	0.000 326 6	1.50	0.000 072 0	0.000 654 5
1.07	0.000 456 3	0.000 331 0	1.60	0.000 083 7	0.000 661 6
1.08	0.000 464 5	0.000 337 3	1.61	0.000 995 5	0.000 668 7
1.00	0.000 472 7	0.000 342 6	1.62	0.001 007 3	0.000 675 8
1.10	0.000 481 0	0.000 348 0	1.63	0.001 010 2	0.000 683 0
1.11	0.000 480 4	0.000 333 5	1.64	0.001 031 2	0.000 600 2
1.12	0.000 407 0	0.000 350 0	1.05	0.001 043 2	0.000 607 4
1.13	0 000 506 4	0.000 364 5	1.66	0.001 055 3	0.000 704 7
1.14	0.000 515 0	0.000 370 0	1.67	0.001 067 5	0.000 712 0
1.15	0.000 523 7	0.000 375 6	1.68	0.001 070 7	0.000 719 3
1.16	0.000 532 4	0.000 381 2	1.60	0.001 002 0	0.000 726 6
1.17	0.000 541 2	0.000 386 0	1.70	0.001 104 4	0.000 734 0
1.18	0.000 550 0	0.000 302 6	1.71	0.001 116 0	0.000 741 4
1.10	0.000 550 0	0.000 308 3	1.72	0.001 120 3	0.000 748 0
1.20	0.000 568 0	0.000 404 0	1.73	0.001 141 0	0.000 756 4
1.21	0.000 577 1	0.000 400 8	1.74	0.001 154 5	0.000 763 0
1.22	0.000 586 2	0.000 415 0	1.75	0.001 167 2	0.000 771 4
1.23	0.000 505 4	0.000 421 5	1.76	0.001 180 0	0.000 770 0
1.24	0.000 604 7	0.000 427 4	1.77	0.001 202 8	0.000 786 6
1.25	0.000 614 0	0.000 433 3	1.78	0.001 205 7	0.000 794 2
1.26	0.000 623 4	0.000 430 3	1.70	0.001 218 7	0.000 801 0
1.27	0.000 632 0	0.000 445 2	1.80	0.001 231 7	0.000 800 6
1.28	0.000 642 5	0.000 451 3	1.81	0.001 244 8	0.000 817 3
1 20	0.000 652 1	0.000 457 4	1.82	0.001 258 0	0.000 825 1
1.30	0.000 661 8	0.000 463 4	1.83	0.001 271 2	0.000 832 0
1.31	0.000 671 5	0.000 460 6	1.84	0.001 284 5	0.000 840 7
1.32	0.000 681 3	0.000 475 7	1.85	0.001 207 8	0.000 848 5
1.33	0.000 601 2	0.000 481 0	1.86	0.001 311 3	0.000 856 4
1.34	0.000 701 1	0.000 488 2	1.87	0.001 324 8	0.000 864 3
1.35	0.000 711 2	0.000 494 4	1.88	0.001 338 4	0.000 872 2
1.36	0.000 721 3	0.000 500 7	1.80	0.001 352 0	0.000 880 2
1.37	0.000 731 5	0.000 507 0	1.00	0.001 365 6	0.000 888 2
1.38	0.000 741 7	0.000 513 4	1.91	0.001 370 4	0.000 806 3
1.30	0.000 752 0	0.000 510 8	1.02	0.001 303 2	0.000 004 3
1.40	0.000 762 3	0.000 526 2	1.03	0.001 407 1	0.000 012 4
1.41	0.000 772 7	0.000 532 7	1.04	0.001 421 0	0.000 020 5
1.42	0.000 783 2	0.000 539 2	1.05	0.001 435 0	0.000 028 7
1.43	0.000 703 8	0.000 545 7	1.05	0.001 440 1	0.000 036 0
1.44	0.000 804 4	0.000 552 3	1.97	0.001 463 3	0.000 045 1
1.45	0.000 815 1	0.000 558 0	1.08	0.001 477 5	0.000 053 3
1.46	0.000 825 0	0.000 565 5	1.99	0.001 401 8	0.000 961 6
1.47	0.000 836 7	0.000 572 1	2.00	0.001 506 2	0.000 960 0
1.48	0.000 847 6	0.000 578 8	2.01	0.001 520 6	0.000 078 2
1.40	0.000 858 6	0.000 585 5	2.02	0.001 535 1	0.000 986 6
1.50	0.000 860 7	0.000 592 3	2.03	0.001 540 6	0.000 904 0

VITESSE moyenne v.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI	VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$.	VITESSE moyenne v.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI.	VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$.
m			m		
2.04	0.001 564 2	0.001 003 4	2.53	0.002 359 2	0.001 451 2
2.05	0.001 578 8	0.001 011 8	2.54	0.002 377 0	0.001 461 0
2.06	0.001 593 5	0.001 020 3	2.55	0.002 304 9	0.001 470 9
2.07	0.001 608 3	0.001 028 8	2.56	0.002 412 0	0.001 480 8
2.08	0,001 623 2	0.001 037 3	2.57	0.002 430 0	0.001 400 7
2.09	0.001 638 2	0.001 045 9	2.58	0.002 449 0	0.001 500 7
2.10	6.001 653 2	0.001 054 5	2.50	0.002 467 1	0.001 510 7
2.11	0.001 668 3	0.001 063 1	2.60	0.002 485 3	0.001 520 7
2.12	0.001 683 4	0.001 071 7	2.61	0.002 503 6	0 001 530 7
2.13	0.001 608 6	0.001 080 4	2.62	0.002 522 0	0.001 540 8
2.14	0.001 713 8	0.001 080 1	2.63	0.002 540 4	0.001 550 0
2.15	0.001 729 1	0.001 997 9	2.64	0.002 558 9	0.001 561 0
2.16	0.001 744 5	0.001 106 6	2.65	0.002 577 4	0.001 571 2
2.17	6.001 759 9	0.001 115 4	2 60	0.002 506 0	0.001 581 3
2.18	6.001 775 4	0.001 124 3	2.67	0.002 614 7	0.001 501 5
2.19	0.001 791 0	0.001 133 1	2.68	0.002 633 4	0.001 001 8
2.20	0.001 806 7	0.001 142 0	2.69	0.002 652 2	0.001 612 1
2.21	0.001 822 4	0.001 150 9	2.70	0.002 671 0	0.001 622 4
2.22	9.001 838 2	0.001 159 9	2.71	0.002 680 9	0,001 632 7
2.23	6.001 854 0	6.001 168 0	2.72	0.002 708 0	0,001 043 0
2.24	0.001 869 9	0,001 177 8	2.73	0.002 728 0	0,001 053 4
2.25	0.001 885 0	0.001 180 0	2.74	0.002 747 1	0.001 663 8
2.26	0.001 902 0	0.001 105 0	2.75	0.002 706 3	0,001 674 2
2.27	0.001 918 1	0.001 205 0	2.70	0.002 785 5	0,001 684 6
2.28	0.001 034 2	0.001 214 1	2.77	0.002 804 8	0.001 695 1
2.20	0.001 050 4	0.001 223 3	2.78	0.002 824 2	0.001 705 6
2.30	0.001 900 7	0.001 232 5	2.70	0.002 843 6	0,001 716 2
2.31	0.001 983 1	0.001 241 7	2.80	0.002 863 1	0.001 726 7
2.32	9.001 900 5	0.001 250 0	2.81	0.002 882 7	0,001 737 3
2.33	0.002 016 0	0.001 260 1	2.82	0.002 002 3	0,001 747 9
2.34	0.002 032 6	0,001 260 4	2.83	0.002 022 0	0,001 758 5
2.35	0.002 049 2	0,001 278 7	2.84	0.002 941 7	0,001 760 2
2.36	0.002 065 8	0,001 288 1	2.85	0.002 061 5	0.001 770 0
2.37	0.002 082 5	0,001 207 4	2.80	0.002 081 4	0.001 790 6
2.38	6.002 000 3	0 001 306 8	2.87	0.003 001 3	0,001 801 4
2.30	0.002 116 2	0,001 316 3	2.88	0.003 021 3	0,001 812 1
2.40	0.002 133 2	0,001 325 7	2.89	0.003 041 4	0.001 822 9
2.41	0.002 150 2	0,001 335 2	2 90	0.003 001 5	0.001 833 7
2.42	0.002 167 3	0,001 344 7	2.91	0.003 081 7	0.001 844 6
2.43	0.092 184 4	0,001 354 3	2.02	0.003 101 0	0.001 855 5
2.44	0.002 201 6	0,001 363 8	2.03	0.003 122 2	0.001 806 4
2.45	0.002 218 9	0.001 373 4	2.04	0.003 142 6	0,001 877 3
2.46	0.002 236 2	0,001 383 1	2.95	0.003 163 0	0.001 888 3
2.47	0.002 253 6	0,001 302 7	2.06	0.003 183 5	0.001 890 2
2.48	0.002 271 0	0,001 402 4	2.07	0.003 204 1	0.001 910 3
2.49	0.002 288 5	0.001 412 1	2.08	0.003 224 7	0.001 921 3
2.50	0.002 306 1	0.001 421 9	2.00	0.003 245 4	0.001 032 4
2.51	0.002 323 7	0.001 431 6	3.00	0.003 206 1	0.001 943 5
2.52	0.002 341 4	0.001 441 4			

162. L'application suivante va faire comprendre la marche à suivre dans l'établissement des tuyaux de conduite d'eau, en faisant usage de la table de Prony (page 124); marche qui serait analogue pour l'établissement des canaux découverts.

Soit à déterminer le diamètre d'une conduite de 5 000 mètres de longueur, capable de débiter 60 mètres cubes d'eau par heure, la charge totale, c'est-à-dire la différence de niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire et dans le réservoir alimenté, étant de 5 mètres.

La dépense par seconde est de $\frac{60\,000}{3\,600} = 16,666\,7$ litres.

La charge J (161) par mètre est de $\frac{5}{5\,000} = 0^m,001$.

Cela posé, on procède par tâtonnement, en essayant différents diamètres :

Pour une conduite de $0^m,20$ de diamètre, dans les circonstances précédentes, on a

$$\frac{1}{4}\mathrm{DJ} = \frac{0,20 \times 0,001}{4} = 0,000\,05. \qquad (161)$$

Cherchant dans la table la valeur de $\frac{1}{4}$ DJ qui approche le plus de la valeur 0,000 05 sans la surpasser, on trouve 0,000 048 7 qui correspond à la vitesse moyenne $0^m,35$ par seconde.

La section de la conduite de $0^m,20$ de diamètre étant de 3,141 6 décimètres carrés, le débit par seconde est de

$$3,141\,6 \times 3,5 = 10,995\,6 \text{ litres;}$$

le diamètre $0^m,20$ est donc trop faible.

Essayant un diamètre plus grand, $0^m,24$ par exemple, on a

$$\frac{1}{4}\mathrm{DJ} = \frac{0,24 \times 0,001}{4} = 0,000\,06,$$

et la table donne pour la valeur de $\frac{1}{4}$ DJ immédiatement inférieure à 0,000 06, 0,000 059 7 qui correspond à la vitesse moyenne $0^m,39$.

La section du tuyau étant de 4,523 9 décimètres carrés, le débit par seconde est de

$$4,523\,9 \times 3,9 = 17,643\,2 \text{ litres.}$$

Le diamètre $0^m,24$ est donc un peu fort; mais, à cause des dépôts séléniteux ou vaseux qui se forment dans les tuyaux de conduite, et qui en diminuent la section et par suite le débit, il convient d'adopter $0^m,24$ pour diamètre de la conduite. Du reste, on déterminerait plus exac-

tement le diamètre devant satisfaire au tableau de Prony, en continuant le tâtonnement.

165. C'est afin d'éviter ces tâtonnements que nous avons calculé la table suivante, qui donne, pour différents diamètres, les dépenses et les charges par mètre de longueur de conduite correspondant à différentes vitesses moyennes de l'eau dans chaque conduite. Les diamètres compris dans cette table sont tels, que chacun d'eux diffère assez peu de ceux immédiatement inférieur et supérieur, pour que le débit à produire sous une certaine charge tombant entre les débits des deux diamètres de la table, sous la même charge, on puisse juger, à la simple inspection, quel serait à peu près le diamètre exact que donnerait la table de Prony, et balancer l'augmentation que l'on juge convenable pour obvier à l'influence des dépôts, sans craindre d'employer un diamètre trop grand, ce qui entraînerait dans des dépenses inutiles.

Lorsqu'on établit une distribution d'eau dans une ville, il convient de ne pas avoir un trop grand nombre de diamètres différents pour les divers embranchements de la conduite, afin de diminuer, autant que possible, les frais de modèles; mais il faut avoir soin aussi de ne pas pécher en sens contraire, c'est-à-dire de ne pas employer des diamètres trop grands pour les débits à produire; car bientôt l'excès de matière contenue dans les tuyaux et l'augmentation du prix des robinets dépasseraient l'économie faite sur les modèles.

Une considération à laquelle il convient d'avoir égard en fixant le débit d'une conduite et par suite son diamètre, c'est de savoir si ce débit est susceptible de devoir être augmenté, par suite d'un accroissement de la population ou de la construction de quelques établissements industriels.

M. Mary a déjà calculé une table analogue à celle qui va suivre, pour les diamètres employés à la distribution des eaux dans Paris. M. Morin a aussi calculé une table analogue à celle de M. Mary.

La première colonne de notre table est commune à tous les diamètres qui se trouvent sur la page, et elle donne les différentes vitesses moyennes de l'eau dans les conduites. La deuxième contient les dépenses correspondant aux vitesses de la première colonne; ces dépenses ont été obtenues en multipliant la section de chaque tuyau par les vitesses moyennes. La troisième renferme les charges J par mètre de longueur de conduite (161), nécessaires pour que les débits soient ceux indiqués dans la deuxième colonne; ces charges ont été déduites de la table de de Prony (161), en divisant les différentes valeurs de $\frac{1}{4}$ DJ, correspondant aux vitesses moyennes de la première colonne de notre table, par $\frac{1}{4}$ D.

TABLE relative à l'établissement des tuyaux de conduite d'eau.

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.05 Section *id.* 0mc.0019635		Diamèt. de la conduite 0m 06 Section *id.* 0mc.00282744		Diamèt. de la conduite 0m.07 Section *id.* 0mc.00384846	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.005	0.0098	0.000 007 02	0.0141	0.000 006 35	0.0192	0.000 005 44
0.01	0.0196	0.000 010 66	0.0283	0.000 013 88	0.0385	0.000 011 90
0.02	0.0393	0.000 038 88	0.0565	0.000 032 40	0.0770	0.000 027 77
0.03	0.0589	0.000 066 08	0.0848	0.000 055 57	0.1155	0.000 047 63
0.04	0.0785	0.000 100 04	0.1131	0.000 083 37	0.1539	0.000 071 46
0.05	0.0982	0.000 138 08	0.1414	0.000 115 82	0.1924	0.000 099 27
0.06	0.1178	0.000 183 48	0.1696	0.000 152 90	0.2309	0.000 131 00
0.07	0.1374	0.000 233 58	0.1979	0.000 194 65	0.2694	0.000 166 84
0.08	0.1571	0.000 289 22	0.2262	0.000 241 02	0.3079	0.000 200 59
0.09	0 1767	0.000 350 46	0.2545	0.000 292 05	0.3464	0.000 250 33
0.10	0.1963	0.000 417 26	0.2827	0.000 347 72	0.3848	0.000 298 04
0.11	0.2160	0.000 489 04	0.3110	0.000 408 03	0.4233	0.000 349 74
0.12	0.2356	0.000 567 58	0.3393	0.000 472 98	0.4618	0 000 405 41
0.13	0.2552	0.000 651 10	0.3670	0.000 542 58	0.5003	0.000 465 07
0.14	0.2749	0.000 740 18	0.3958	0.000 610 82	0.5388	0.000 528 70
0.15	0.2945	0.000 834 84	0.4241	0.000 695 70	0.5773	0.000 596 31
0.16	0.3142	0.000 935 08	0.4524	0.000 779 23	0.6158	0.000 667 91
0.17	0.3338	0.001 040 88	0.4807	0.000 867 40	0.6542	0.000 743 49
0.18	0.3534	0.001 152 20	0.5089	0.000 960 22	0.0927	0.000 823 04
0.19	0.3731	0.001 269 20	0.5372	0.001 057 67	0.7312	0.000 906 57
0.20	0.3927	0.001 391 74	0.5655	0.001 159 78	0.7097	0.000 994 10
0.22	0.4320	0.001 653 50	0.6220	0.001 377 92	0.8407	0.001 181 07
0.25	0.4909	0.002 087 92	0.7069	0.001 739 93	0.9621	0.001 491 37
0.28	0.5498	0.002 572 50	0.7917	0.002 143 75	1.0775	0.001 837 50
0.30	0.5890	0.002 923 42	0.8482	0.002 436 18	1.1545	0.002 088 18
0.32	0.0283	0.003 296 62	0.9048	0.002 747 18	1.2315	0.002 354 73
0.35	0.6872	0.003 898 22	0.9896	0.003 248 52	1.3470	0.002 784 44
0.38	0.7461	0.004 549 90	1.0744	0.003 791 63	1.4624	0.003 249 97
0.40	0.7854	0.005 012 32	1.1310	0.004 170 93	1.5394	0.003 580 23
0.42	0.8247	0.005 496 90	1.1875	0.004 580 80	1.6104	0.003 920 40
0.45	0.8830	0.006 265 72	1.2723	0.005 221 43	1.7318	0.004 475 51
0.48	0.0425	0.007 084 04	1.3572	0.005 903 87	1.8473	0.005 060 46
0.50	0.9817	0.007 058 44	1.4137	0.006 382 03	1.9242	0.005 470 31
0.55	1.0799	0.009 190 44	1.5551	0.007 658 70	2.1160	0.006 564 60
0.60	1.1781	0.010 801 70	1.6905	0.009 051 47	2.3091	0.007 758 40
0.65	1.2763	0.012 072 38	1.8378	0.010 560 32	2.5015	0.009 051 70
0.70	1.3744	0.014 622 32	1.9792	0.012 185 27	2.6939	0.010 444 51
0.75	1.4726	0.016 711 54	2.1206	0.013 926 28	2.8863	0.011 936 81
0.80	1.5708	0.018 940 08	2.2619	0.015 783 40	3.0788	0.013 528 63
0.85	1.6690	0.021 307 90	2.4033	0.017 756 58	3.2712	0.015 219 93
0.90	1.7671	0.023 815 04	2.5447	0.019 845 87	3.4636	0.017 010 74

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.05 Section *id.* 0mc.0019635		Diamèt. de la conduite 0m.06 Section *id.* 0mc.0028274		Diamèt. de la conduite 0m.07 Section *id.* 0mc.0038484	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.05	1.8653	0.920 401 48	2.6861	9.922 051 23	3.0560	0.018 901 00
1.00	1.0635	0.029 247 24	2.8274	0.024 372 70	3.8484	0.020 800 80
1.05	2.0617	0.032 172 28	2.0688	0.026 810 23	4.9409	0.022 980 20
1.10	2.1508	0.035 236 64	3.1102	0.020 363 87	4.2333	0.025 100 03
1.15	2.2580	0.038 440 30	3.2510	0.032 933 58	4.4257	0.027 457 36
1.20	2.3562	0.041 783 20	3.3929	0.034 819 38	4.6181	0.029 845 19
1.25	2.4544	0.045 205 52	3.5343	0.037 721 27	4.8105	0.032 332 51
1.30	2.5525	0.048 887 08	3.6757	0.040 730 23	5.0030	0.034 019 34
1.35	2.0597	0.052 647 06	3.8170	0.043 873 30	5.1054	0.037 605 00
1.40	2.7489	0.950 548 12	3.9584	0.047 123 43	5.3878	0.049 391 51
1.45	2.8471	0.060 587 60	4.0098	0.050 489 07	5.5803	0.043 270 86
1.50	2.9452	0.064 760 38	4.2412	0.053 971 98	5.7727	0.046 261 70
1.55	3.0434	0.069 084 48	4.3825	0.057 570 40	5.9651	0.040 346 06
1.60	3.1410	0.073 541 86	4.5230	0.961 284 88	6.1575	0.052 520 90
1.65	3.2397	0.078 138 56	4.6653	0.065 115 47	6.3490	0.055 813 26
1.70	3.3370	0.082 874 56	4.8066	0.060 002 13	0.5424	0.050 196 11
1.75	3.4361	0.087 749 86	4.9480	0.073 124 88	0.7348	0.002 678 47
1.80	3.5343	0.002 764 46	5.0804	0.077 303 72	0.0272	0.066 260 33
1.85	3.0324	0.007 918 36	5.2308	0.981 598 63	7.1196	0.069 941 00
1.90	3.7306	0.103 211 58	5.3721	0.086 000 05	7.3129	0.073 722 50
1.05	3.8288	0.108 044 08	5.5135	0.000 536 73	7.5045	0.077 002 91
2.00	3.0270	0.114 215 90	5.6549	0.095 179 92	7.6960	0.081 582 70
2.95	4.0251	0.119 927 02	5.7063	0.000 039 18	7.8803	0.085 002 10
2.10	4.1233	0.125 777 40	5.0376	0.104 814 55	8 0817	0.080 841 04
2.15	4.2215	0.131 767 18	6.0700	0.190 805 98	8.2741	0.004 110 41
2.20	4.3107	0.137 896 22	6.2204	0.114 918 52	8.4666	0.008 497 30
2.25	4.4170	0.144 164 54	6.3617	0.120 137 12	8.6500	0.102 074 67
2.30	4.5100	0.150 572 18	0.5031	0.125 476 82	8.8514	0.107 551 50
2.35	4.6142	0.157 110 12	0.0445	0.130 932 00	9.9438	0.112 227 04
2.40	4.7124	0.103 805 38	6.7850	0.136 504 48	9.2362	0.117 003 84
2.45	4.8106	0.170 630 02	6 0272	0.142 102 43	0.4287	0.121 879 23
2.50	4.9087	0.177 505 78	7.0680	0.147 996 48	9.6211	0.120 854 13
2 55	5.0070	0.184 000 04	7.2100	0.153 910 02	9.8135	0.131 928 53
2.00	5.1051	0.101 948 40	7.3513	0.150 952 83	10.0060	0.137 102 43
2.05	5.2032	0.190, 326 10	7.4027	0.166 105 13	10.1984	0.142 375 83
2.70	5.3014	0.206 848 24	7.0341	0.172 373 53	19.3908	0.147 748 74
2.75	5.3990	0.214 500 60	7.7755	0.178 758 00	19.5832	0.153 221 14
2.80	5.4078	0.222 310 28	7.0108	0.185 258 57	10.7757	0.158 703 06
2.85	5.5960	0 230 250 26	8 0582	0.101 875 22	10.0681	0.164 464 47
2.00	5.6042	0.238 320 56	8.1906	0.108 607 07	11.1005	0.170 235 40
2.05	5.7023	0.246 548 14	8.3400	0.205 456 78	11.3529	0.176 105 81
3.00	5.8095	0.254 906 04	8.4823	0.212 421 70	11.5454	9.182 075 74

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.08$ Section *id.* $0^{mc}.00502656$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.09$ Section *id.* $0^{mc}.00636174$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.10$ Section *id.* $0^{mc}.00785$[illegible]	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.005	0.0251	0.000 004 76	0.0318	0.000 004 23	0.0393	0.000 003 81
0.01	0 0503	0.000 010 41	0.0636	0.000 009 26	0.0785	0.000 008 33
0.02	0.1005	0.000 024 30	0.1272	0.000 021 60	0.1571	0.000 019 44
0.03	0.1508	0.000 041 68	0.1908	0.000 037 05	0.2356	0.000 033 34
0.04	0.2011	0.000 062 53	0.2545	0.000 055 58	0.3142	0.000 050 02
0.05	0.2513	0.000 086 86	0.3181	0.000 077 21	0.3927	0.000 069 49
0.06	0.3016	0.000 114 68	0.3817	0.000 101 93	0.4712	0.000 091 74
0.07	0.3519	0.000 145 99	0.4453	0.000 129 77	0.5498	0.000 116 79
0.08	0.4021	0.000 180 76	0.5089	0.000 160 68	0.6283	0.000 144 61
0.09	0.4524	0.000 219 04	0.5726	0.000 194 70	0.7069	0.000 175 23
0.10	0.5027	0.000 260 79	0.6362	0.000 231 81	0.7854	0.000 208 63
0.11	0 5529	0.000 306 03	0.6998	0.000 272 02	0.8639	0.000 244 82
0.12	0.6032	0.000 354 74	0.7634	0 000 315 32	0.9425	0.000 283 79
0 13	0.6535	0.000 406 94	0.8270	0.000 361 72	1.0210	0.000 325 55
0.14	0.7037	0.000 462 61	0.8906	0.000 411 21	1.0996	0.000 370 09
0.15	0.7540	0.000 521 78	0.9543	0.000 463 80	1.1781	0.000 417 42
0.16	0.8042	0.000 584 43	1.0179	0.000 519 49	1.2566	0.000 467 54
0.17	0.8545	0.000 650 55	1.0815	0.000 578 27	1.3352	0.000 520 44
0.18	0.9048	0.000 720 16	1.1451	0.000 640 15	1.4137	0.000 576 13
0.19	0.9550	0.000 793 25	1.2087	0.000 705 11	1.4923	0.000 634 60
0.20	1.0053	0.000 869 84	1.2723	0.000 773 19	1.5708	0.000 695 87
0.22	1.1058	0.001 033 44	1.3996	0.000 918 61	1.7278	0.000 826 75
0.25	1.2566	0.001 304 95	1.5904	0.001 159 96	1.9635	0.001 043 96
0.28	1.4074	0.001 007 81	1.7813	0.001 429 17	2.1992	0.001 286 25
0.30	1.5080	0.001 827 14	1.9085	0.001 624 12	2.3562	0.001 461 71
0.32	1.6085	0.002 060 39	2.0357	0.001 831 46	2.5132	0.001 648 31
0.35	1.7593	0.002 436 39	2.2266	0.002 165 68	2.7489	0.001 949 11
0.38	1.9100	0.002 843 73	2.4175	0.002 527 76	2.9846	0.002 274 98
0.40	2.0106	0.003 132 70	2.5447	0.002 784 62	3.1416	0.002 506 16
0.42	2.1111	0.003 435 60	2.6719	0.003 053 87	3.2986	0.002 748 48
0.45	2.2620	0.003 916 08	2.8628	0.003 480 96	3.5343	0.003 132 86
0.48	2.4127	0.004 427 90	3.0536	0.003 935 91	3.7700	0.003 542 32
0.50	2.5133	0.004 786 53	3.1809	0.004 254 69	3.9270	0.003 829 22
0.55	2.7646	0.005 744 03	3.4989	0.005 105 80	4.3197	0.004 595 22
0.60	3.0159	0.006 788 60	3.8170	0.006 034 31	4.7124	0.005 430 88
0.65	3.2672	0.007 920 24	4.1351	0.007 040 21	5.1051	0.006 336 19
0.70	3.5186	0.009 138 95	4.4532	0.008 123 51	5.4978	0.007 311 16
0.75	3.7699	0.010 444 71	4.7713	0.009 284 19	5.8905	0.008 355 77
0.80	4.0212	0.011 837 55	5.0894	0.010 522 27	6.2832	0.009 470 04
0.85	4.2725	0 013 317 44	5.4075	0.011 837 72	6.6759	0.010 653 95
0.90	4.5239	0.014 884 40	5.7255	0.013 230 58	7.0686	0.011 907 52

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.08$ Section *id.* $0^{mc}.06562656$		Diamèt. de la conduite $6^{m}.09$ Section *id.* $6^{mc}.00636174$		Diamèt. de la conduite $6^{m}.16$ Section *id.* $6^{mc}.007854$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.95	4.7752	0.016 538 43	6.0436	0.014 766 82	7.4613	0.013 230 74
1.00	5.0266	0.018 279 53	6.3617	0.016 248 47	7.8540	0.014 623 62
1.05	5.2779	0.026 167 68	6.6798	0.017 873 49	8.2467	0.016 086 14
1.10	5.5292	0.022 022 90	6.9979	0.019 575 91	8.6394	0.017 618 32
1.15	5.7805	0.024 025 19	7.3160	0.021 355 72	9.6321	0.019 226 15
1.20	6.0319	0.026 114 54	7.6341	0.623 212 92	9.4248	0.020 891 63
1.25	6.2832	0.028 290 95	7.9522	0.025 147 51	9.8175	0.022 632 76
1.30	6.5345	0.036 554 43	8.2702	0.027 159 49	10.2102	0.024 443 54
1.35	6.7858	0.032 964 98	8.5883	0.029 248 87	10.6029	0.026 323 98
1.40	7.6372	0.035 342 58	8.9064	0.031 415 62	10.9956	0.028 274 06
1.45	7.2885	0.037 867 25	9.2245	0.033 659 78	11.3883	0.030 293 80
1.50	7.5398	0.040 478 99	9.5426	0.035 981 32	11.7810	0.032 383 19
1.55	7.7911	0.643 177 80	9.8607	0.038 380 27	12.1737	0.034 542 24
1.60	8.0425	0.045 963 66	16 1788	0.040 856 59	12.5664	0.036 770 93
1.65	8.2937	0.048 836 60	10.4968	0.043 416 31	12.9591	0.639 069 28
1.70	8.5451	0.051 796 60	16.8149	0.046 041 42	13.3518	0.041 437 28
1.75	8.7965	0.054 843 66	11.1330	0.048 749 92	13.7445	0.643 874 93
1.80	9.0478	0.057 977 79	11.4511	0.051 535 81	14.1372	0.046 382 23
1.85	9.2991	0.061 198 98	11.7692	0.054 399 09	14.5299	0.048 959 18
1.90	9.5505	0.664 507 24	12.0873	0.057 339 77	14.9226	0.051 605 79
1.95	9.8018	0.067 902 55	12.4653	0.066 357 82	15.3153	0.054 322 04
2.00	16.0531	0.071 384 94	12.7234	0.063 453 28	15.7081	0.057 167 95
2.65	10.8044	0.674 954 39	13.0415	0.066 026 12	16.1007	0.059 963 51
2.10	10.5558	0.078 610 91	13.3596	0.069 876 37	16.4934	0.062 888 73
2.15	10.8071	0 082 354 49	13.6777	0.073 203 99	16.8861	0.065 883 59
2.20	11.6584	0.086 185 14	13.9958	0.076 609 01	17.2788	0.668 948 11
3.25	11.3097	0.090 102 84	14.3139	0.080 091 41	17.6715	0.072 082 27
2.30	11.5610	0.094 107 61	14.6320	0.083 651 21	18.6642	0.075 286 69
2.35	11.8124	0.098 199 45	14.9501	0.087 288 40	18.4569	0.078 559 56
2.40	12.0637	6.102 378 36	15.2682	0.091 002 99	18.8496	0.081 902 69
2.45	12.3150	0.106 644 33	15.5862	6.094 794 96	19.2423	0.085 315 46
2.50	12.5664	0.110 997 36	15.9643	0.098 664 32	19.6350	0.088 797 89
2.55	12.8177	0.115 437 46	16.2224	0.102 611 08	26.6277	0.092 349 97
2.60	13.0690	9.119 964 63	16.5465	0.106 635 22	20.4204	0.095 971 76
2.65	13.3263	0.124 578 85	16.8586	0.110 736 76	20.8131	0.099 663 08
2.70	13.5717	0.129 280 15	17.1766	0.114 915 69	21.2058	0.103 424 12
2.75	13.8230	0.134 068 50	17.4947	0.119 172 00	21.5985	0.107 254 80
2.80	14.0743	0.138 943 93	17.8128	0.123 505 71	21.9912	0.111 155 14
2.85	14.3256	0.143 906 41	18.1309	0.127 916 81	22.3839	0.115 125 13
2.90	14.5770	0.148 955 98	18.4490	0.132 465 31	22.7766	0.119 164 78
2.95	14.8283	0.154 092 59	18.7671	0.136 971 19	23.1693	0.123 274 07
3.00	15.0797	0 159 316 28	19.0852	0.141 614 47	23.5620	0.127 453 02

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.11$ Section *id.* $0^{mc}.00950334$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.12$ Section *id.* $0^{mc}.01130976$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.14$ Section *id.* $0^{mc}.01539384$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.0950	0.000 007 57	0.1131	0.000 000 94	0.1539	0.000 005 95
0.02	0.1901	0.000 017 67	0.2262	0.000 016 20	0.3079	0.000 013 89
0.03	0.2851	0.000 030 31	0.3393	0.000 027 79	0.4618	0.000 023 82
0.04	0.3801	0.000 045 47	0.4524	0.000 041 69	0.0158	0.000 035 73
0.05	0.4752	0.000 063 17	0.5655	0.000 057 91	0.7697	0.000 049 64
0.06	0.5702	0.000 083 40	0.6786	0.000 076 45	0.9236	0 000 065 53
0.07	0.6652	0.000 106 17	0.7917	0.000 097 33	1.0776	0.000 083 42
0.08	0.7603	0 000 131 46	0.9048	0.000 120 51	1.2315	0.000 103 30
0.09	0.8553	0.000 159 30	1.0179	0.000 146 03	1.3854	0.000 125 17
0.10	0.9503	0.000 189 66	1.1310	0.000 173 86	1.5394	0.000 149 02
0.11	1.0454	0.000 222 50	1.2441	0.000 204 02	1 6933	0.000 174 87
0.12	1.1404	0.000 257 99	1.3572	0.000 236 49	1.8473	0.000 202 71
0.13	1.2354	0.000 295 95	1.4703	0.000 271 29	2.0012	0.000 232 54
0.14	1.3305	0.000 336 45	1.5834	0.000 308 41	2.1551	0.000 264 35
0.15	1.4255	0.000 379 47	1.6965	0.000 347 85	2.3091	0.000 298 16
0.16	1.5205	0.000 425 04	1.8096	0.000 389 61	2.4630	0.000 333 96
0.17	1.6156	0.000 473 13	1.9227	0.000 433 70	2.0169	0.000 371 75
0.18	1.7106	0.000 523 75	2.0358	0.000 480 11	2.7709	0.000 411 52
0.19	1.8056	0.000 576 91	2.1489	0.000 528 84	2.9248	0.000 453 28
0.20	1.9007	0.000 632 61	2.2620	0.000 579 89	3.0788	0.000 497 15
0.22	2.0907	0.000 751 50	2.4881	0.000 688 96	3.3866	0.000 590 54
0.25	2.3758	0.000 949 05	2.8274	0.000 869 97	3.8485	0.000 745 69
0.28	2.6609	0.001 169 32	3.1667	0.001 071 88	4.3103	0.000 918 75
0.30	2.8510	0.001 328 83	3.3929	0.001 218 09	4.6182	0.001 044 08
0.32	3.0411	0.001 498 46	3.6191	0.001 373 59	4.9260	0.001 177 37
0.35	3.3262	0.001 771 92	3.9584	0.001 624 26	5.3878	0.001 392 22
0.38	3.6113	0.002 068 16	4.2977	0.001 895 82	5.8497	0.001 624 99
0.40	3.8013	0.002 278 33	4.5239	0.002 088 47	6.1575	0.001 790 12
0.42	3.9914	0.002 498 62	4.7501	0.002 290 40	6.4654	0.001 963 20
0.45	4.2765	0.002 848 05	5.0894	0 002 610 72	6.9272	0.002 237 76
0.48	4.5616	0.003 220 29	5.4287	0.002 951 94	7.3890	0.002 530 23
0.50	4.7517	0.003 481 11	5.6549	0.003 191 02	7.6969	0.002 735 16
0.55	5.2268	0.004 177 47	6.2204	0.003 829 35	8.4666	0.003 282 30
0.60	5.7020	0.004 937 16	6.7859	0.004 525 74	9.2363	0.003 879 20
0.65	6.1772	0.005 760 17	7.3513	0.005 280 16	10 0060	0.004 525 85
0.70	6.6523	0.006 646 51	7.9168	0.006 092 64	10.7757	0.005 222 26
0.75	7.1275	0.007 596 15	8.4823	0.006 963 14	11.5454	0.005 968 41
0.80	7.6027	0.008 609 13	9.0478	0.007 891 70	12.3151	0.006 764 32
0.85	8.0778	0.009 085 41	9.6133	0.008 878 29	13.0848	0.007 609 97
0.90	8.5530	0.010 825 02	10.1788	0.009 922 93	13.8545	0.008 505 37
0.95	9.0282	0.012 027 95	10.7443	0.011 025 62	14.6242	0.009 450 53

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^m.11$ Section *id.* $0^{mc}.00050334$		Diamèt. de la conduite $0^m.12$ Section *id.* $0^{mc}.01130976$		Diamèt. de la conduite $0^m.14$ Section *id.* $0^{mc}.01530384$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	9.5033	0.013 294 20	11.3008	0.012 180 35	15.3938	0.010 443 45
1.05	9.9785	0.014 623 70	11.8753	0.013 405 12	10.1035	0.011 400 10
1.10	10.4537	0.016 016 05	12.4407	0.014 081 04	16.9332	0.012 584 52
1.15	10.0288	0.017 472 86	13.0062	0.016 016 79	17.7020	0.013 728 68
1.20	11.4040	0.018 992 39	13.5717	0.017 409 09	18.4726	0.014 922 59
1.25	11.8702	0.020 575 24	14.1372	0.018 860 64	10.2423	0.010 166 26
1.30	12.3543	0.022 221 40	14.7027	0.020 369 62	20.0120	0.017 459 07
1.35	12.8205	0.023 930 80	15.2682	0.021 036 65	20.7817	0.018 802 85
1.40	13.3047	0.025 703 60	15.8337	0.023 561 72	21 5514	0.020 195 76
1.45	13.7798	0.027 539 82	10.3002	0.025 244 84	22.3211	0.021 638 43
1.50	14.2550	0.020 430 26	16.0040	0.026 085 00	23.0008	0.023 130 85
1.55	14.7302	0.031 402 04	17.5301	0.028 785 20	23.8604	0.024 073 03
1.60	15.2053	0.033 428 12	18.0056	0.030 642 44	24.6301	0.026 264 95
1.05	15.6805	0.035 517 53	18.6011	0.032 557 74	25.3098	0.027 006 63
1.70	16.1557	0.037 070 25	19.2266	0.034 531 07	20.1605	0.029 508 06
1.75	16.0308	0.039 886 30	10.7021	0.036 562 44	26.9392	0.031 339 24
1.80	17.1060	0.042 165 00	20.3576	0.038 651 80	27.7080	0.033 130 17
1.85	17.5812	0.044 508 35	20.0231	0.040 799 32	28.4786	0.034 970 85
1.00	18.0563	0.040 014 35	21.4885	0.043 004 83	29.2483	0.036 861 28
1.95	18.5315	0.040 383 67	22.0540	0.045 208 37	30.0180	0.038 801 46
2.00	10.0067	0.051 916 32	22.6105	0.047 589 96	30.7877	0.040 701 40
2.05	19.4818	0.054 512 28	23.1850	0.049 060 50	31.5574	0.042 831 08
2.10	19.9570	0.057 171 57	23.7505	0.052 407 28	32.3271	0.044 920 52
2.15	20.4322	0.050 804 17	24.3160	0.054 002 90	33.0068	0.047 050 71
2.20	20.0073	0.002 080 10	24.8815	0.057 450 76	33.8004	0.040 248 65
2.25	21.3825	0.063 520 34	25.4470	0.060 008 56	34.6301	0.051 487 34
2.30	21.8577	0.068 441 90	26.0124	0.062 738 41	35.4058	0.053 775 78
2.35	22.3328	0.071 417 78	20.5770	0.005 460 30	36.1755	0.050 113 97
2.40	22.8080	0.074 456 90	27.1434	0.008 252 24	30.0452	0.058 501 92
2.45	23.2832	0.077 550 51	27.7080	0.071 000 22	37.7149	0.000 039 62
2.50	23.7583	0.080 725 35	28.2744	0.073 008 24	38.4840	0.003 427 07
2 55	24.2335	0.083 034 52	28.8399	0.070 938 31	39.2543	0.065 064 27
2.60	24.7087	0.087 247 00	29.4054	0.070 970 42	40.0240	0.008 551 22
2.65	25.1830	0.090 602 80	29.0700	0.083 052 57	40.7937	0.071 187 02
2.70	25.0590	0.094 021 03	30.5364	0.080 180 77	41.5634	0.073 874 37
2.75	26.1342	0.007 504 30	31.1018	0.080 370 00	42.3331	0.076 610 57
2.80	26.0004	0.101 050 13	31.0673	0.002 620 29	43.1027	0.070 306 53
2.85	27.0845	0.104 650 21	32.2328	0.095 037 61	43.8724	0.082 232 24
2.00	27.5597	0 108 331 62	32.7983	0.099 303 09	44.6421	0.085 117 70
2.95	28.0349	0.112 067 34	33.3638	0.102 728 39	45.4118	0.088 052 01
3.00	28.5100	0.115 866 38	33.0293	0.106 210 85	46.1815	0.091 037 87

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.15$ Section *id.* $0^{mc}.0176715$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.16$ Section *id.* $0^{mc}.0201024$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.18$ Section *id.* $0^{mc}.02544096$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m	l.	m.
0.01	0.1767	0.000 005 55	0.2011	0.000 005 21	0.2545	0.000 004 03
0.02	0.3534	0.000 012 06	0.4021	0.000 012 15	0.5089	0.000 010 80
0.03	0.5301	0.000 022 23	0.0032	0.000 020 84	0.7634	0.000 018 53
0.04	0.7069	0.000 033 35	0.8042	0.000 031 27	1.0170	0.000 027 70
0.05	0.8836	0.000 040 33	1.0053	0.000 043 43	1.2723	0.000 038 61
0.06	1.0603	0.000 001 10	1.2004	0.000 057 34	1.5268	0.000 050 07
0.07	1.[illegible]70	0.000 077 80	1.4074	0.000 073 00	1.7813	0.000 064 80
0.08	1.4137	0.000 090 41	1.0085	0.000 000 38	2.0358	0.000 080 34
0.00	1.5904	0.000 116 82	1.8000	0.000 100 52	2.2002	0.000 007 35
0.10	1.7671	0.000 130 00	2.0106	0.000 130 40	2.5447	0.000 115 01
0.11	1.0430	0.000 163 21	2.2117	0.000 153 02	2.7002	0.000 136 01
0.12	2.1206	0.000 180 10	2.4127	0.000 177 37	3.0530	0.000 157 60
0.18	2.2973	0.000 217 03	2.0138	0.000 203 47	3.3081	0.000 180 86
0.14	2.4740	0.000 246 73	2.8140	0.000 231 31	3.5626	0.000 205 01
0.15	2.6507	0.000 278 28	3.0150	0.000 200 80	3.8170	0.000 231 00
0.10	2.8274	0.000 311 69	3.2170	0.000 292 22	4.0715	0.000 250 75
0.17	3.0042	0.000 346 96	3.4181	0.000 325 28	4.3260	0.000 280 14
0.18	3.1800	0.000 384 09	3.0101	0.000 300 08	4.5805	0.000 320 08
0.10	8.3570	0.000 423 07	3.8202	0.000 396 03	4.8340	0.000 352 56
0.20	8.5343	0.000 463 01	4.0212	0.000 434 02	5.0804	0.000 386 60
0.22	3.8877	0.000 551 17	4.4234	0.000 516 72	5.5083	0.000 450 31
0.25	4.4179	0.000 605 07	5.0260	0.000 652 48	0.3017	0.000 570 98
0.28	4.0480	0.000 857 50	5.0207	0.000 803 01	7.1251	0.000 714 50
0.30	5.3014	0.000 074 47	0.0310	0.000 013 57	7.0341	0.000 812 06
0.32	5.6540	0.001 098 87	0.4340	0.001 030 20	8.1430	0.000 015 73
0.35	6.1850	0.001 200 41	7.0372	0.001 218 20	8.0004	0.001 082 84
0.38	6.7152	0.001 516 05	7.0404	0.001 421 87	0.0608	0.001 203 88
0.40	7.0686	0.001 670 77	8.0425	0.001 506 35	10.1788	0.001 302 31
0.42	7.4220	0.001 832 32	8.4446	0.001 717 80	10.6877	0.001 526 94
0.45	7.9522	0.002 088 57	0.0478	0.001 058 04	11.4511	0.001 740 48
0.48	8.4823	0.002 301 55	0.6510	0.002 213 05	12.2145	0.001 907 96
0.50	8.8357	0.002 552 81	10.0531	0.002 393 27	12.7235	0.002 127 35
0.55	0.7103	0.003 063 48	11.0584	0.002 872 02	13.0058	0.002 552 00
0.00	10.6020	0.003 020 50	12.0637	0.003 304 30	15.2682	0.003 017 10
0.65	11.4865	0.004 224 13	13.0690	0.003 000 12	16.5405	0.003 520 11
0.70	12.3700	0.004 874 11	14.0744	0.004 509 48	17.8120	0.004 061 76
0.75	13.2530	0.005 570 51	15.0707	0.005 222 30	10.0852	0.004 042 10
0.80	14.1372	0.006 313 30	10.0850	0.005 018 78	20.3570	0.005 261 14
0.85	15.0208	0.007 102 63	17.0903	0.006 058 72	21.6209	0.005 018 86
0.90	15.0043	0.007 938 35	18.0050	0.007 442 20	22.9023	0.000 615 29
0.05	16.7870	0.008 820 49	10.1000	0.008 209 22	24.1746	0.007 350 41

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $9^{m}.15$ Section *id.* $9^{mc}.9176715$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.16$ Section *id.* $9^{mc}.02010624$		Diamèt. de la conduite $9^{m}.18$ Section *id.* $9^{mc}.02544696$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	17.6715	0.909 749 08	29.1062	9.909 139 77	25.4479	9.008 124 24
1.05	18.5550	0.010 724 09	21.1115	9.019 953 84	26.7193	0.098 939 75
1.10	19.4386	0.011 745 55	22.1199	9.911 911 45	27 9017	9.009 787 96
1.15	29.3222	9.912 813 43	23.1222	0.012 912 60	29.2649	0.019 677 86
1.20	21.2958	9.013 927 75	24.1275	9.013 057 27	30.5364	9.011 906 49
1.25	22.0893	9.915 988 51	25.1328	0.914 145 48	31.8087	0.012 573 79
1.30	22.9729	9.919 295 99	26.1381	0.915 277 22	33.9810	9.013 579 75
1.35	23.8565	9.917 549 32	27.1434	9.919 452 49	34.3534	0.014 624 44
1.40	24.7401	9.018 849 37	28.1487	9.017 671 29	35.9257	9.915 797 81
1.45	25.9237	0.929 195 87	29.1549	9.918 933 63	36.8981	0.916 829 89
1.50	29.5972	9.021 588 79	30.1594	9.920 239 59	38.1704	0.817 990 66
1.55	27.3908	9.923 928 16	31.1947	9.921 588 99	39.4428	9.919 190 13
1.69	28.2744	9.024 513 95	32.1709	9.022 981 83	40.7151	0.020 428 30
1.65	29.1589	0.929 949 19	33.1753	9.024 418 39	41.9875	9.021 705 16
1.70	39.9415	9.927 924 85	34.1896	9.925 898 30	43.2598	0.023 920 71
1.75	39.9251	9.929 249 95	35.1859	9.927 421 83	44.5322	9.024 374 96
1.89	31.8087	0.930 921 49	36.1912	9.028 988 90	45.8045	0.025 767 91
1.85	32.6922	9.932 639 45	37.1965	0.930 509 49	47.9769	9.027 199 55
1.90	33.5758	9.834 403 89	38.2019	9.932 253 62	48.3492	9.028 669 89
1.95	34.4594	9.036 214 69	39.2072	9.933 951 28	49.9216	9.030 178 91
2.99	35.3430	0.938 071 97	40.2125	9.835 092 47	50.8939	9.931 726 64
2.95	36.2295	0.039 975 67	41.2178	9.937 477 49	52.1963	0.033 313 06
2.19	37.1191	9.041 925 82	42.2231	0.039 395 49	53.4386	9.034 938 19
2.15	37.9937	0.043 922 39	43.2284	9.941 177 25	54.7119	9.936 902 00
2.20	38.8772	9.945 965 41	44.2337	9.943 092 57	55.9833	0.038 304 51
2.25	39.7608	9.048 954 85	45.2390	9.045 951 42	57.2557	9.940 945 71
2.30	40.6444	9.959 109 73	46.2443	0.047 953 81	58.5280	0.041 825 61
2.35	41.5279	9.052 373 94	47.2496	9.049 999 73	59.8004	9.043 644 20
2.40	42.4115	0.954 691 79	48.2559	0.051 189 18	61.9727	0.945 501 50
2.45	43.2951	9.056 879 97	49.2993	0.953 322 17	62.3451	0.947 307 48
2.50	44.1787	9.059 198 59	50.2656	9.955 498 98	63.6174	0.949 332 16
2.55	45.9623	9.061 566 65	51.2709	0.957 718 73	64.8897	9.051 305 54
2.69	45.9458	9.063 981 13	52.2792	0.959 982 32	69.1920	9.953 317 61
2.65	46.8294	9.066 442 95	53.2815	9.062 289 43	67.4344	0.035 368 38
2.79	47.7139	9.068 949 41	54.2868	9.064 640 08	98.7068	9.957 457 85
2.75	48.5966	9.071 503 20	55.2921	9.067 034 25	69.9791	9.959 586 00
2.80	49.4802	0.974 103 43	56.2975	9.969 471 97	71.2515	9.091 752 86
2.85	59.3937	9.076 759 99	57.3028	9.071 953 21	72 5238	9.063 958 41
2.90	51.2473	9.979 443 19	58.3081	0.974 477 99	73.7962	9.066 202 66
2.95	52.1399	0.082 182 71	59.3135	9.977 949 39	75.9685	0.068 485 60
3.00	53.9145	0.084 968 98	90.3187	9.079 638 14	76.3409	9.970 807 24

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.20 Section id. 0mc.031416		Diamèt. de la conduite 0m.22 Section id. 0mc.03801336		Diamèt. de la conduite 0m.24 Section id. 0mc.04523904	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.3142	9.009 004 17	0.3801	0.009 903 79	0.4524	0.000 003 47
9.02	0.0283	0.000 009 72	9.7603	0.900 008 84	9 9048	0.000 008 10
0.93	0.9425	9.000 010 67	1.1404	0.000 915 10	1.3572	0.000 013 90
0.04	1.2566	0.900 025 01	1.5205	0.000 022 74	1.8096	9 000 020 85
0.05	1.5708	0.000 034 75	1.9007	0.900 931 59	2.2619	0.000 028 96
9.06	1.8850	0.000 945 87	2.2808	9.000 041 70	2.7143	0.000 038 23
9.97	2.1991	0.000 958 40	2.9909	9.000 053 09	3.1697	0.000 948 97
0.98	2.5133	0.000 072 31	3.0411	9.009 065 73	3.0191	9.000 060 26
9.09	2.8274	0.900 087 92	3.4212	0.000 079 05	4.0715	9.009 073 02
0.10	3.1416	9.000 104 32	3.8013	9.000 094 83	4.5239	0.000 986 93
0.11	3.4558	9.000 122 41	4.1815	0.000 111 28	4.9793	0.000 102 01
0.12	3.7099	0.009 141 99	4.5616	9.909 129 00	5.4287	0.090 118 25
9.13	4.0841	9.000 162 78	4.9417	9.009 147 98	5.8811	0.900 135 05
9.14	4.3982	9.000 185 05	5.3219	0.000 168 23	0.3335	9.900 154 21
9.15	4.7124	0.000 208 71	5.7920	0.000 189 74	9.7859	0.900 173 93
9.10	5.0205	0.000 233 77	6.0821	0.090 212 52	7.2382	9.000 194 81
9.17	5.3407	0.000 200 22	0.4623	0.000 236 57	7.6900	0.009 219 85
0.18	5.0549	0.909 288 07	0.8424	0.009 261 88	8.1430	0.009 240 99
0.19	5.9999	0.990 317 30	7.2225	0.000 288 49	8.5954	0.000 264 42
0.20	6.2832	9.000 347 94	7.6027	0.000 310 31	9.0478	0.000 289 95
0.22	9.9119	0.000 413 38	8.3629	0.000 375 80	9.9526	0.000 344 48
9.25	7.8549	0.000 521 98	9.5033	0.000 474 53	11.3998	0.000 434 99
0.28	8.7994	0.000 943 13	10.6437	9.000 584 66	12.6669	9.000 535 94
0.30	9.4248	9.900 730 86	11.4040	9.900 664 42	13.5717	0.900 009 05
0.32	10.0531	0.000 824 16	12.1043	0.000 749 23	14.4765	9.000 086 89
9.35	19.9959	9.000 974 56	13.3047	9.000 885 96	15.8337	0.900 812 13
0.38	11.9380	0.001 137 49	14.4459	0 001 034 08	17.1908	0.000 947 91
0.40	12.5904	0.001 253 08	15.2053	0.001 139 17	18.0950	0.091 944 24
0.42	13.1947	9.091 374 24	15.9659	0.001 249 31	19.0004	9.001 145 20
0.45	14.1372	0.091 569 43	17.1000	0.901 424 03	20.3576	0.001 305 36
0.48	15.0797	0.001 771 19	18.2494	0.001 919 15	21.7147	0.901 475 97
0.50	15.7080	0.001 914 91	19.0097	9.001 740 56	22.9195	9.001 595 51
0.55	17.2788	9.002 297 91	20.9073	9.002 068 74	24.8815	0.901 914 68
0.60	18.8496	0.902 715 44	22.8080	0.002 468 58	27.1434	9.002 262 87
9.95	29.4204	9.003 168 10	24.7087	0.002 880 09	29.4054	9.902 949 08
0.70	21.9912	0.003 655 58	29.9094	0.003 323 20	31.0673	0 003 949 32
0.75	23.5029	0.004 177 89	28.5109	9.003 798 08	33.9293	9.003 481 57
0.80	25.1328	0.004 735 02	30.4107	0.004 304 57	30.1912	0.003 945 85
0.85	26.7030	0.005 326 98	32.3114	0.004 842 71	38.4532	0.004 439 15
0.90	28.2744	0.095 053 79	34.2120	0.005 412 51	40.7151	9.004 991 47
0.95	29.8452	0.006 615 37	36.1127	9.006 913 98	42.9771	9.005 512 81

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.20$ Section *id.* $0^{mc}.031410$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.22$ Section *id.* $0^{mc}.03891330$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.24$ Section *id.* $0^{mc}.04523904$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	31.4169	9.007 311 81	38.0134	9.006 647 19	45.2390	9.006 903 18
1.05	32 0868	0.008 043 07	30.0140	9.907 311 88	47.5019	9.906 702 56
1.10	34.5570	0.008 899 16	41.8147	0.008 908 33	49.7620	0.007 349 07
1.15	36.1284	0.009 010 08	43.7154	9.908 736 43	52.0249	0.008 908 40
1.20	37.0002	0,010 445 82	45.6169	0.909 496 29	54.2868	0.008 704 85
1.25	30.2700	9.011 310 38	47.5107	9.010 287 02	56.5488	9.000 439 32
1.30	49.8408	9.012 221 77	49.4174	0.911 119 70	58.8108	0.010 184 81
1.35	42.4116	0.013 101 90	51.3180	9.011 005 45	01.0727	0.910 008 33
1.40	43.9824	0.014 137 03	53.2187	0.012 851 85	63.3347	0.911 780 86
1.45	45.5532	0.015 146 09	55.1194	9.913 769 91	65.5066	9.012 622 42
1.50	47.1240	9.010 101 09	57.0200	9.014 719 63	67.8580	0.013 403 00
1.55	48.6948	9.917 271 12	58.0207	0.915 701 02	70.1295	0.014 392 69
1.00	50.2656	0.018 385 47	60.8214	0.016 714 06	72.3825	9.015 321 22
1.65	51.8364	0.019 534 04	62.7220	0.017 758 77	74.6444	9.016 278 87
1.70	53.4072	0.020 718 04	04.6227	9.918 835 13	70.9964	9.017 265 54
1.75	54.9780	0.021 937 47	66.5234	9.919 943 15	79.1683	9.918 281 22
1.80	56.5488	9.023 191 12	68.4240	0.921 082 83	81.4303	0.019 325 93
1.85	58.1196	0.024 479 59	70.3247	0.022 254 18	83.0022	0.020 309 66
1.90	50.6004	9.925 802 90	72.2254	9.023 457 18	85.0542	0.921 592 42
1.05	61.2012	0.927 161 02	74.1201	0.024 601 84	88.2161	0.022 634 10
2.00	62.8320	0.928 553 08	76.0267	0.925 058 10	00.4781	0.023 794 08
2.05	64.4028	0.020 081 76	77.9274	0.027 256 14	92.7400	9.024 984 80
2.10	65.0730	0.031 444 37	70.8281	0.028 585 79	95.9020	0.020 203 04
2.15	67.5444	0.032 041 89	81.7287	0.029 947 09	97.2630	0.927 431 59
2.20	69.1152	0.934 474 06	83.6294	9 031 349 05	99.5250	0.928 728 38
2.25	70.6800	0.036 041 14	85.5301	0.932 764 67	101.7878	0.030 034 28
2.39	72.2508	0.037 043 05	87.4307	0.034 220 95	194.9498	0.031 360 21
2.35	73.8276	0.030 279 78	89.3314	0.035 708 80	190.3117	0.032 733 15
2.40	75.3084	0.949 051 35	91.2321	0.037 228 50	108.5737	0.934 126 12
2.45	76.9602	0.042 657 73	03.1327	0.038 770 70	110.8350	0.935 548 11
2.59	78.5400	9.044 308 05	95.0334	9.040 392 08	113.0076	0.036 999 12
2.55	80.1108	0.046 174 00	96.9341	9.041 077 26	115.3595	0.038 479 16
2.69	81.0816	9.047 985 85	08.8347	0.043 623 50	117.6215	0.930 988 21
2.65	83.2524	9.940 831 54	109.7354	0.045 301 40	110.8835	9.941 526 29
2.70	84.8232	9.051 712 06	192.0361	0.047 010 07	122.1454	0.943 003 39
2.75	86.3940	0 053 027 40	104.5367	0.048 752 18	124.4074	0.944 689 50
2.80	87.9648	9.055 577 57	106.4374	0.050 525 07	120.6003	0.946 314 05
2.85	89.5356	0.957 562 57	108 3381	0.052 329 61	128.0313	0.047 908 81
2.90	91.1004	0.059 582 39	119.2387	0.054 165 81	131.1932	9.949 652 99
2.95	92.0772	0.001 637 04	112.1394	0.050 033 67	133.4552	9.951 304 20
3.00	94.2480	0.003 726 51	114.0401	0.057 933 19	135.7171	0.953 105 43

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.25 Section id. 0mc.0490875		Diamèt. de la conduite 0m.28 Section id. 0mc.96157536		Diamèt. de la conduite 0m.30 Section id. 9mc.070686	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l	m.	l.	m.
0.01	0.4909	0.000 003 33	0.6158	0.000 002 98	0.7069	0.000 002 78
0.02	0.9817	0.000 007 78	1.2315	0.000 006 95	1.4137	0.000 006 48
0.03	1.4726	0.000 013 34	1.8473	0.000 011 91	2.1206	0.000 011 12
0.04	1.9635	0.000 020 01	2.4630	0.000 017 87	2.8274	0.000 016 68
0.05	2.4544	0.000 027 80	3.0788	0.000 024 82	3.5343	0.000 023 17
0.06	2.9452	0.000 036 70	3.6945	0.000 032 77	4.2412	0.000 030 58
0.07	3.4361	0.000 046 72	4.3103	0.900 041 71	4.9480	0.000 038 93
0.08	3.9270	0.000 057 84	4.9260	0.000 051 65	5.6549	0.000 048 21
0.09	4.4179	0.000 070 09	5.5418	0.000 062 59	6.3617	0.000 058 41
0.10	4.9087	0.000 083 45	6.1575	0.000 074 51	7.0686	0.000 069 55
0.11	5.3906	0.000 097 93	6.7733	0.000 087 44	7.7755	0.000 081 61
0.12	5.8905	0.000 113 52	7.3800	0.000 101 36	8.4823	0.000 094 60
0.13	6.3814	0.000 180 22	8.0048	0.000 116 27	9.1892	0.000 108 52
0.14	6.8722	0.000 148 04	8.6205	0.000 132 18	0.8960	0.000 123 37
0.15	7.3631	0.000 166 97	9.2363	0.000 149 08	10.6029	0.000 130 14
0.16	7.8549	0.000 187 92	9.8521	0.000 166 98	11.3098	0.000 155 85
0.17	8.3449	0.000 208 18	10.4678	0.000 185 88	12.0166	0.000 173 48
0.18	8.8357	0.000 230 45	11.9836	0.000 295 76	12.7235	0.000 192 05
0.19	9.3266	0.000 253 84	11.6903	0.000 226 64	13.4303	0.000 211 54
0.20	0.8175	0.000 278 35	12.3151	0.000 248 58	14.1372	0.000 231 96
0.22	10.7992	0.000 330 70	13.5466	0.000 295 27	15.5509	0.000 275 59
0.25	12.2719	0.000 417 58	15.3938	0.000 372 85	17.6715	0.000 347 09
0.28	13.7445	0.000 514 50	17.2411	0.000 459 38	19.7921	0.000 428 75
0.30	14.7262	0.000 584 68	18.4720	0.000 522 04	21.2058	0.000 487 24
0.32	15.7080	0.000 659 32	19.7041	0.000 588 60	22.0195	0.000 549 44
0.35	17.1806	0.000 779 04	21.5514	0.000 696 11	24.7401	0.000 649 71
0.38	18.6532	0.000 909 99	23.3986	0.000 812 50	26.8607	0.000 758 33
0.40	19.0350	0.001 002 46	24.6301	0.000 895 96	28.2744	0.000 835 39
0.42	20.0167	0.001 090 30	25.8616	0.000 081 60	29.0881	0.000 916 16
0.45	22.0894	0.001 253 14	27.7089	0 001 118 88	31.8087	0.001 044 29
0.48	23.5620	0.001 416 03	29.5562	0.001 265 12	33.0203	0.001 180 78
0.50	24.5437	0.001 531 69	30.7877	0.001 367 58	35.3430	0.001 276 41
0.55	26.9981	0.001 838 09	33.8664	0.001 641 15	38.8773	0.001 531 74
0.60	20.4525	0.002 172 35	36.9452	0.001 930 60	42.4110	0.001 810 30
0.65	31.9069	0 002 534 48	40.0240	0.002 262 03	45.9459	0.002 112 07
0.70	34.3612	0.002 924 46	43.1027	0.002 011 13	49.4802	0.002 437 06
0.75	30.8156	0.003 342 31	46.1815	0.002 084 21	53.0145	0.002 785 26
0.80	39.2700	0.003 788 02	49.2603	0.003 882 16	56.5488	0.003 156 68
0.85	41.7244	0.004 261 58	52.3301	0.003 804 99	60.0831	0.003 551 32
0.90	44.1787	0.004 763 01	55.4178	0.004 252 69	63.6174	0.003 969 18
0.05	46.6331	0.005 292 30	58.4966	0.004 725 27	67.1517	0.004 410 25

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.25 Section *id.* 0mc.0490875		Diamèt. de la conduite 0m.28 Section *id.* 0mc.06157536		Diamèt. de la conduite 0m.30 Section *id.* 0mc.070686	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	49.0875	0.005 849 45	61.5754	0.005 222 79	70.6860	0.004 874 54
1.05	51.5418	0.006 434 46	64.6541	0.005 745 05	74.2203	0.065 362 05
1.10	53.9962	0.007 047 33	67.7329	0.006 292 26	77.7546	0.065 872 78
1.15	56.4506	0.007 688 06	70.8117	0.006 864 34	81.2889	0.006 406 72
1.20	58.9050	0.068 356 65	73.8904	0.007 461 30	84.8232	0.006 963 88
1.25	61.3593	0.009 053 10	76.9692	0.008 083 13	88.3575	0.007 544 26
1.30	63.8137	0.009 777 42	80.0480	0.008 729 84	91.8918	0.068 147 85
1.35	66.2681	0.010 529 59	83.1267	0.009 401 43	95.4261	0.068 774 66
1.40	68.7225	0.011 309 62	86.2055	0.010 097 88	98.9664	0.009 424 69
1.45	71.1769	0.012 117 52	89.2843	0.010 819 22	102.4947	0.010 097 94
1.50	73.6312	0.012 953 28	92.3630	0.011 565 43	106.0290	0.010 794 40
1.55	76.0856	0.013 816 90	95.4418	0.012 336 52	109.5633	0.011 514 08
1.60	78.5460	0.014 708 37	98.5206	0.013 132 48	113.0976	0.012 256 98
1.65	80.9944	0.015 627 71	101.5993	0.013 953 32	116.6319	0.013 623 10
1.70	83.4487	0.016 574 91	164.6781	0.014 799 03	120.1662	0.013 812 43
1.75	85.9031	0.017 549 97	107.7569	0.015 669 62	123.7005	0.014 624 98
1.80	88.3575	0.018 552 89	110.8356	0.016 565 09	127.2348	0.015 460 75
1.85	90.8118	0.019 583 67	113.0144	0.017 485 43	130.7691	0 016 319 73
1.90	93.2662	0.020 642 32	116.9932	0.018 430 64	134.3034	0.017 201 93
1.95	95.7206	0.021 728 82	120.0719	0.019 400 73	137.8377	0.018 107 35
2.00	98.1750	0.022 843 18	123.1507	0.020 395 70	141.3720	0.019 035 99
2.05	100.6293	0.623 985 40	126.2295	0.021 415 54	144.9063	0.019 987 84
2.10	103.0837	0.025 155 49	129.3083	0.022 460 26	148.4406	0.020 962 91
2.15	105.5381	0.026 353 44	132.3870	0.023 529 85	151.9749	0.021 961 20
2.20	107.9924	0.027 579 24	135.4658	0.024 624 33	155.5092	0.022 982 71
2.25	110.4468	0.028 832 91	138.5446	0.025 743 67	159.0435	0.024 027 43
2.30	112.9012	0.030 114 44	141.6233	0.026 887 89	162.5778	0.025 095 37
2.35	115.3555	0.031 423 82	144.7021	0.028 056 99	166.1121	0.026 186 52
2.40	117.8099	6.032 761 08	147.7809	0.029 250 96	169.6464	0.027 300 90
2.45	120.2643	0.034 126 18	150.8596	0.030 469 81	173.1807	0.028 438 49
2.50	122.7187	0.035 519 16	153.9384	0.031 718 54	176.7150	0.029 599 30
2.55	125.1731	0.036 939 99	157.0172	0.032 982 14	180.2493	0.030 783 33
2.60	127.6274	0.038 388 68	160.0959	0.034 275 61	183.7836	0.031 990 57
2.65	130.0818	0.039 865 23	163.1747	0.035 593 96	187.3179	0.033 221 03
2.70	132.5362	0.041 369 65	166.2535	0.036 937 19	190.8522	0.034 474 71
2.75	134.9906	0.042 901 92	169.3322	0.038 305 29	194.3865	0.035 751 60
2.80	137.4450	0.044 462 06	172.4110	0.039 698 27	197.9208	0.037 051 72
2.85	139.8993	0.046 050 05	175.4898	0.041 116 12	201.4551	0.038 375 05
2.90	142.3537	0.047 665 91	178.5685	0.042 558 85	204.9894	0.039 721 60
2.95	144.8081	0.049 309 63	181.6473	0.044 026 46	268.5237	0.041 091 36
3.00	147.2625	0.050 981 21	184.7261	0.045 518 94	212.0580	0.042 484 34

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.32 Section *id.* 0mc.08042496		Diamèt. de la conduite 0m.35 Section *id.* 0mc.0902115		Diamèt. de la conduite 0m.38 Section *id.* 0mc.11341	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.8042	0.000 002 61	0.9621	0.000 002 38	1.1341	0.000 002 19
0.02	1.6085	0.000 006 08	1.9242	0.000 005 55	2.2682	0.000 005 12
0.03	2.4127	0.000 010 42	2.8863	0.000 009 53	3.4023	0.000 008 77
0.04	3.2170	0.000 015 64	3.8485	0.000 014 29	4.5364	0.000 013 10
0.05	4.0212	0.000 021 72	4.8106	0.000 019 85	5.6705	0.000 018 29
0.00	4.8255	0.000 028 67	5.7727	0.000 026 21	6.8046	0.000 024 14
0.07	5.6297	0.000 030 50	6.7348	0.000 033 37	7.9387	0.000 030 73
0.08	0.4340	0.000 045 19	7.6969	0.000 041 32	9.0728	0.000 038 06
0.09	7.2382	0.000 054 76	8.6590	0.000 050 07	10.2069	0.000 046 11
0.10	8.0425	0.000 065 20	9.0211	0.000 059 61	11.3410	0.000 054 90
0.11	8.8467	0.000 070 51	10.5833	0.000 069 95	12.4751	0.000 064 43
0.12	9.0510	0.000 088 69	11.5454	0.000 081 08	13 0092	0.000 074 68
0 13	10.4552	0.000 101 74	12.5075	0.000 093 01	14.7433	0.000 085 67
0.14	11.2595	0.000 115 06	13.4696	0.000 105 74	15.8774	0.000 097 39
0.15	12.0637	0.000 130 45	14.4317	0.000 119 26	17.0115	0.000 109 85
0.16	12.8680	0.000 146 11	15.3938	0.000 133 58	18.1456	0.000 123 04
0.17	13.6722	0.000 162 64	16.3500	0.000 148 70	19.2797	0.000 136 96
0.18	14.4765	0.000 180 04	17.3181	0.000 164 61	20.4138	0.000 151 61
0.19	15.2807	0.000 198 32	18.2802	0.000 181 31	21.5479	0.000 167 00
0.20	16.0850	0.000 217 46	19.2423	0.000 198 82	22.6820	0.000 183 13
0.22	17.6935	0.000 258 36	21.1665	0.000 236 21	24.9502	0.000 217 57
0.25	20.1062	0.000 320 24	24.0529	0.000 298 27	28.3525	0.000 274 73
0.28	22.5190	0.000 401 96	26.9392	0.000 367 50	31.7548	0.000 338 49
0.30	24.1275	0.000 456 79	28.8634	0.000 417 63	34.0230	0.000 384 06
0.32	25.7360	0.000 515 10	30.7877	0.000 470 95	36.2912	0.000 433 77
0.35	28.1487	0.000 609 10	33.6740	0.000 556 89	39.0935	0.000 512 92
0.38	30.5615	0.000 710 94	36.5604	0.000 649 99	43.0958	0.000 598 68
0.40	32.1700	0.000 783 18	38.4846	0.000 716 05	45.3640	0.000 659 52
0.42	33.7785	0.000 858 90	40.4088	0.000 785 28	47.0322	0.000 723 28
0.45	36.1912	0.000 979 02	43.2952	0.000 895 10	51.0345	0.000 824 44
0.48	38.6040	0.001 100 98	40.1815	0.001 012 09	54.4368	0.000 932 19
0.50	40.2125	0.001 196 64	48.1057	0.001 094 06	56.7050	0.001 007 69
0.55	44.2337	0.001 430 01	52.9163	0.001 312 92	62.3755	0.001 209 27
0.60	48.2550	0.001 697 15	57.7209	0.001 551 68	68.0400	0.001 429 18
0.65	52.2762	0.001 980 06	62.5375	0.001 810 34	73.7105	0.001 607 42
0.70	56.2975	0.002 284 74	67.3480	0.002 088 90	79.3870	0.001 923 99
0.75	60.3187	0.002 611 18	72.1586	0.002 387 36	85.0575	0.002 198 89
0.80	64.3400	0.002 959 30	76.9692	0.002 705 73	90.7280	0.002 492 12
0.85	68.3612	0.003 329 36	81.7798	0.003 043 99	96.3985	0.002 803 67
0.90	72.3825	0.003 721 10	80.5903	0.003 402 15	102.0690	0.003 133 55
0.95	76.4037	0.004 134 61	91.4009	0.003 780 21	107.7395	0.003 481 77

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.32$ Section *id.* $0^{mc}.08042496$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.35$ Section *id.* $0^{mc}.0962115$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.38$ Section *id.* $0^{mc}.11341$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	80.4250	0.004 569 80	06.2115	0.004 178 18	113.4100	0.003 848 32
1.05	84.4462	0.005 026 02	101.0221	0.004 506 04	119.0805	0.004 233 10
1.10	88.4675	0.005 505 73	105.8326	0.005 033 81	124.7510	0.004 636 40
1.15	92.4887	0.006 006 30	110.6432	0.005 491 47	130.4215	0.005 057 03
1.20	96.5100	0.006 528 64	115.4538	0.005 060 04	136.0020	0.005 497 80
1.25	100.5312	0.007 072 74	120.2644	0.006 466 50	141.7625	0.005 055 09
1.30	104.5524	0.007 638 61	125.0749	0.006 983 87	147.4330	0.006 432 51
1.35	108.5737	0.008 226 25	129.8855	0.007 521 14	153.1035	0.006 027 36
1.40	112.5040	0.008 835 65	134.6961	0.008 078 30	158.7740	0.007 440 54
1.45	116.6162	0.009 466 82	139.5067	0.008 655 37	164.4445	0.007 072 05
1.50	120.6374	0.010 119 75	144.3172	0.000 252 34	170.1150	0.008 521 89
1.55	124.6587	0.010 704 45	149.1278	0.009 869 21	175.7855	0.000 000 06
1.60	128.6799	0.011 490 92	153.0384	0.010 505 98	181.4560	0.009 676 56
1.65	132.7012	0.012 200 15	158.7400	0.011 162 65	187.1265	0.010 281 30
1.70	136.7224	0.012 049 15	163.5505	0.011 839 22	102.7070	0.010 904 55
1.75	140.7437	0.013 710 92	168.3701	0.012 535 60	108.4675	0.011 546 03
1.80	144.7640	0.014 404 45	173.1807	0.013 252 07	204.1380	0.012 205 85
1.85	148.7862	0.015 200 75	177.9913	0.013 088 34	200.8085	0.012 884 00
1.90	152.8074	0.016 126 81	182.8018	0.014 744 51	215.4700	0.013 580 47
1.05	156.8287	0.016 975 64	187.6124	0.015 520 58	221.1495	0.014 205 27
2.00	160.8499	0.017 846 24	102.4230	0.016 316 56	226.8200	0.015 028 41
2.05	164.8712	0.018 738 70	107.2336	0.017 132 43	232.4005	0.015 779 87
2.10	168.8924	0.010 652 73	202.0441	0.017 968 21	238.1610	0.016 549 67
2.15	172.9137	0.020 588 63	206.8547	0.018 823 88	243.8315	0.017 337 70
2.20	176.9349	0.021 546 29	211.6653	0.019 690 46	240.5020	0.018 144 24
2.25	180.9562	0.022 525 71	216.4750	0.020 594 03	255.1725	0.018 909 02
2.30	184.0774	0.023 526 90	221.2864	0.021 510 31	260.8430	0.010 812 13
2.35	188.9987	0.024 540 87	226.0970	0.022 445 59	266.5135	0.020 673 57
2.40	193.0199	0.025 504 59	230.0076	0.023 400 77	272.1840	0.021 553 34
2.45	197.0412	0.026 661 09	235.7182	0.024 375 85	277.8545	0.022 451 44
2.50	201.0624	0.027 749 34	240.5287	0.025 370 83	283.5250	0.023 367 86
2.55	205.0836	0.028 859 37	245.3303	0.026 385 71	280.1055	0.024 302 62
2.60	209.1048	0.020 991 16	250.1499	0.027 420 49	204.8660	0.025 255 71
2.65	213.1261	0.031 144 72	254.0604	0.028 475 17	300.5365	0.026 227 13
2.70	217.1474	0.032 320 04	250.7710	0.029 540 75	300.2070	0.027 216 87
2.75	221.1686	0.033 517 13	264.5816	0.030 644 23	311.8775	0.028 224 03
2.80	225.1899	0.034 735 99	260.3922	0.031 758 61	317.5480	0.029 251 33
2.85	229.2111	0.035 976 61	274.2027	0.032 892 80	323.2185	0.030 296 09
2.90	233.2324	0.037 239 00	279.0133	0.034 047 08	328.8890	0.031 350 15
2.95	237.2536	0.038 523 15	283.8239	0.035 221 16	334.5505	0.032 440 54
3.00	241.2749	0.030 820 07	288.6345	0.036 415 15	340.2300	0.033 540 27

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.40$ Section *id.* $0^{mc}.125664$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.42$ Section *id.* $0^{mc}.13854456$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.45$ Section *id.* $0^{mc}.1590435$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	1.2566	0.000 002 09	1.3854	0.000 001 98	1.5904	0.000 001 85
0.02	2.5133	0.000 004 86	2.7709	0.000 004 63	3.1809	0.000 004 32
0.03	3.7699	0.000 008 34	4.1563	0.000 007 94	4.7713	0.000 007 41
0.04	5.0266	0.000 012 51	5.5418	0.000 011 91	6.3617	0.000 011 12
0.05	6.2832	0.000 017 38	6.9272	0.000 016 55	7.9522	0.000 015 44
0.06	7.5398	0.000 022 94	8.3127	0.000 021 84	9.5426	0.000 020 39
0.07	8.7965	0.000 029 20	9.6981	0.000 027 81	11.1330	0.000 025 95
0.08	10.0531	0.000 036 16	11.0836	0.000 034 43	12.7235	0.000 032 14
0.09	11.3098	0.000 043 81	12.4690	0.000 041 72	14.3139	0.000 038 94
0.10	12.5664	0.000 052 16	13.8545	0.000 049 67	15.9043	0.000 046 36
0.11	13.8230	0.000 061 21	15.2399	0.000 058 29	17.4948	0.000 054 40
0.12	15.0797	0.000 070 95	16.6253	0.000 067 57	19.0852	0.000 063 06
0 13	16.3363	0.000 081 39	18.0108	0.000 077 51	20.6757	0.000 072 34
0.14	17.5930	0.000 092 53	19.3962	0.000 088 12	22.2661	0.000 082 24
0.15	18.8496	0.000 104 36	20.7817	0.000 099 39	23.8565	0.000 092 76
0.16	20.1062	0.000 116 89	22.1671	0.000 111 32	25.4470	0.000 103 90
0.17	21.3629	0.000 130 11	23.5526	0.000 123 92	27.0374	0.000 115 65
0.18	22.6195	0.000 144 04	24.9380	0.000 137 17	28.6278	0.000 128 03
0.19	23.8762	0.000 158 65	26.3235	0.000 151 09	30.2183	0.000 141 02
0.20	25.1328	0.000 173 97	27.7089	0.000 165 72	31.8087	0.000 154 64
0.22	27.6461	0.000 206 69	30.4798	0.000 196 85	34.9896	0.000 183 72
0.25	31.4160	0.000 260 99	34.6361	0.000 248 56	39.7609	0.000 231 99
0.28	35.1859	0.000 321 57	38.7925	0.000 306 25	44.5322	0.000 285 83
0.30	37.6992	0.000 365 43	41.5634	0.000 348 03	47.7130	0.000 324 82
0.32	40.2125	0.000 412 08	44.3343	0.000 392 46	50.8939	0.000 366 29
0.35	43.9824	0.000 487 28	48.4906	0.000 464 07	55.6652	0.000 433 14
0.38	47.7523	0.000 568 75	52.6469	0.000 541 66	60.4365	0.000 505 55
0.40	50.2656	0.000 626 54	55.4178	0.000 596 71	63.6174	0.000 556 92
0.42	52.7789	0.000 687 12	58.1887	0.000 654 40	66.7983	0.000 610 77
0.45	56.5488	0.000 783 22	62.3451	0.000 745 92	71.5696	0.000 696 19
0.48	60.3187	0.000 885 58	66.5014	0.000 843 41	76.3409	0.000 787 18
0.50	62.8320	0.000 957 31	09.2723	0.000 911 72	79.5217	0.000 850 94
0.55	69.1152	0.001 148 81	76.1995	0.001 094 10	87.4739	0.001 021 16
0.60	75.3984	0.001 357 72	83.1267	0.001 293 07	95.4261	0.001 206 86
0.65	81.6816	0.001 584 05	90.0540	0.001 508 62	103.3783	0.001 408 04
0.70	87.9648	0.001 827 79	96.9812	0.001 740 75	111.3304	0.001 624 70
0.75	94.2480	0.002 088 95	103.9084	0.001 989 47	119.2826	0.001 856 84
0.80	100.5312	0.002 367 51	110.8356	0.002 254 77	127.2348	0.002 104 45
0.85	106.8144	0.002 663 49	117.7629	0.002 536 66	135.1870	0.002 367 54
0.90	113.0976	0.002 976 88	124.6901	0.002 835 12	143.1391	0.002 646 12
0.95	110.3808	0.003 307 69	131.6173	0.003 150 18	151.0913	0.002 940 16

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.49 Section *id.* 0mc.125664		Diamèt. de la conduite 0m.42 Section *id.* 9mc.13854456		Diamèt. de la conduite 0m.45 Section *id.* 0mc.1590435	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépeoses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de coodoite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	125.6640	0.003 635 91	138.5446	0.003 481 82	159.0435	0.003 249 69
1.05	131.9472	0.004 021 54	145.4718	0.003 830 03	166.9957	0.003 574 70
1.10	138.2304	0.004 494 58	152.3999	0.004 104 84	174.9478	0.003 915 18
1.15	144.5136	0.004 805 04	159.3262	0.004 576 23	182.9000	0.094 271 14
1.20	150.7968	0.005 222 91	166.2535	0.004 974 20	190.8522	0.004 642 58
1.25	157.0800	0.005 658 19	173.1807	0.095 388 75	198.8044	0.005 029 50
1.30	163.3632	0.006 110 88	180.1079	0.005 819 89	206.7565	0.005 431 90
1.35	169.6464	0.006 581 00	187.0352	0.006 267 62	214.7087	0.005 840 77
1.40	175.9296	0.007 068 52	193.9624	0.096 731 92	222.6609	0.006 283 12
1.45	182.2128	0.007 573 45	200.8896	0.007 212 81	230.6131	0.096 731 96
1.50	188.4960	0.008 095 80	207.8168	0.007 710 28	238.5652	0.007 196 26
1.55	194.7792	0.008 635 56	214.7441	0.008 224 34	246.5174	0.007 676 05
1.60	201.0624	0.009 192 74	221.6713	0.008 754 98	254.4696	0.008 171 32
1.65	207.3456	0.009 767 32	228.5985	0.009 302 21	262.4218	0.008 682 06
1.70	213.6288	0.010 359 32	235.5258	0.009 866 02	270.3739	0.009 208 28
1.75	219.9120	0.010 968 74	242.4530	0.010 446 41	278.3261	0.009 749 93
1.80	226.1952	0.011 595 56	249.3802	0.011 043 39	286.2783	0.010 307 16
1.85	232.4784	6.012 239 80	256.3974	0.011 656 95	294.2305	0.010 879 82
1.90	238.7616	0.012 901 45	263.2347	0.012 287 09	302.1826	0.011 467 95
1.95	245.0448	0.013 580 51	270.1619	0.012 933 82	310.1348	0.012 071 56
2.00	251.3280	6.014 276 99	277.0891	0.013 597 13	318.0870	0.012 690 66
2.05	257.6112	0.014 990 88	284.0164	0.914 277 03	326.0392	0.013 325 22
2.10	263.8944	0.015 722 19	290.9436	0.014 973 51	333.9913	0.013 075 27
2.15	269.1776	0.016 470 90	297.8708	0.015 686 57	341.9435	0.914 640 80
2.20	276.4698	0.017 237 03	304.7980	0.016 410 22	349.8957	0.015 321 80
2.25	282.7440	6.018 020 57	311.7253	0.017 162 45	357.8479	0.016 018 28
2.30	289.9272	0.018 821 53	318.6525	0.017 925 26	365.8000	0.016 730 24
2.35	295.3104	0.019 639 89	325.5797	0.018 704 66	373.7522	0.017 457 68
2.40	301.5936	0.029 475 68	332.5969	0.019 500 64	381.5044	0.018 200 60
2.45	307.8768	0.021 328 87	839.4342	0.020 313 21	389.6566	0.018 958 99
2.50	314.1600	0.022 199 48	346.3614	0.021 142 36	397.6087	0.019 732 86
2.55	320.4432	0.023 087 50	353.2886	0.021 968 09	405.5609	0.920 522 22
2.60	326.7264	0.023 992 93	360.2159	0.022 850 41	413.5131	0.921 327 04
2.65	333.0096	0.024 915 77	367.1431	0.023 729 31	421.4652	0.922 147 35
2.70	339.2928	0.025 856 03	374.0793	0.024 624 79	429.4174	0.022 983 14
2.75	345.5760	0.026 813 70	380.9975	0.025 536 86	437.3696	0.023 834 40
2.80	351.8592	0.027 786 79	387.9248	0.026 465 51	445.3218	0.024 701 14
2.85	358.1424	0.028 781 29	304.8520	0.027 410 75	453.2739	0.025 583 36
2.90	364.4256	6.029 791 20	401.7792	0.028 372 57	461.2261	0.026 481 06
2.95	370.7088	0.030 818 52	408.7064	0.029 350 97	469.1783	0.027 394 24
3.00	376.9920	0.031 863 26	415.6337	0.030 345 96	477.1305	0.028 322 89

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.48$ Section *id.* $0^{mc}.18005016$ Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.50$ Section *id.* $0^{mc}.10035$ Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.55$ Section *id.* $0^{mc}.2375835$ Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m	l.	m.
0.01	1.8096	0.000 001 74	1.0035	0.000 001 07	2.3758	0.000 001 51
0.02	3.0101	0.000 004 05	3.9270	0.000 003 80	4.7517	0.000 003 54
0.03	0.4287	0.000 006 05	5.8005	0.000 000 07	7.1275	0.000 006 06
0.04	7.2382	0.000 010 43	7.8540	0.000 010 01	0.5033	0.000 009 09
0.05	0.0478	0.000 014 48	0.8175	0.000 013 90	11.8702	0.000 012 03
0.00	10.8574	0.000 010 12	11.7810	0.000 018 35	14.2550	0.000 016 68
0.07	12.0000	0.000 024 34	13.7445	0.000 023 36	16.0308	0.000 021 23
0.08	14.4705	0.000 030 13	15.7080	0.000 028 02	10.0007	0.000 026 29
0.00	10.2861	0.000 030 51	17.6715	0.000 035 05	21.3825	0.000 031 86
0.10	18.0056	0.000 043 47	10.6350	0.000 041 73	23.7583	0.000 037 03
0.11	10.9052	0.000 051 01	21.5085	0.000 048 07	20.1342	0.000 044 51
0.12	21.7147	0.000 050 13	23.5620	0.000 056 76	28.5100	0.000 051 00
0.13	23.5243	0.000 067 83	25.5255	0.000 005 11	30.8850	0.000 050 19
0.14	25.3330	0.000 077 11	27.4800	0.000 074 02	33.2617	0.000 067 20
0.15	27.1434	0.000 086 07	29.4525	0.000 083 40	35.6375	0.000 075 80
0.16	28.0530	0.000 007 41	31.4160	0.000 003 51	38.0134	0.000 085 01
0.17	30.7025	0.000 108 43	33.3705	0.000 104 09	40.3802	0.000 004 63
0.18	32.5721	0.000 120 03	35.3430	0.000 115 23	42.7650	0.000 104 75
0.10	34.3817	0.000 132 21	37.3065	0.000 126 02	45.1409	0.000 115 38
0.20	36.1912	0.000 144 08	30.2700	0.000 130 17	47.5107	0.000 120 52
0.22	30.8104	0.000 172 24	43.1070	0.000 105 35	52.2084	0.000 150 32
0.25	45.2390	0.000 217 50	40.0875	0.000 208 70	50.3050	0.000 180 81
0.28	50.6677	0.000 267 07	54.0780	0.000 257 25	66.5234	0.000 233 80
0.30	54.2868	0.000 304 53	58.0050	0.000 202 34	71.2750	0.000 265 77
0.32	57.9060	0.000 343 40	62.8320	0.000 320 00	76.0267	0.000 290 00
0.35	63.3347	0.000 400 07	68.7225	0.000 380 82	83.1542	0.000 354 38
0.38	68.7633	0.000 478 00	74.6130	0.000 455 00	00.2817	0.000 413 63
0.40	72.3825	0.000 522 12	78.5400	0.000 501 23	05.0334	0.000 455 07
0.42	76.0010	0.000 572 00	82.4670	0.000 540 70	99.7851	0.000 499 72
0.45	81.4303	0.000 052 08	88.3575	0.000 020 57	100.0120	0.000 560 61
0.48	80.8500	0.000 737 00	04.2480	0.000 708 47	114.0401	0.000 044 06
0.50	90.4781	0.000 707 70	08.1750	0.000 705 84	118.7017	0.000 006 22
0.55	09.5250	0.000 057 34	107.9925	0.000 019 04	130.6700	0.000 835 40
0.00	108.5737	0.001 131 44	117.8100	0.001 080 18	142.5501	0.000 087 43
0.65	117.6215	0.001 320 04	127.0275	0.001 267 24	154.4293	0.001 152 03
0.70	126.0693	0.001 523 10	137.4450	0.001 402 23	166.3084	0.001 329 30
0.75	135.7171	0.001 740 70	147.2625	0.001 071 15	178.1870	0.001 510 23
0.80	144.7040	0.001 072 03	157.0800	0.001 804 01	100.0668	0.001 721 83
0.85	153.8127	0.002 219 58	166.8975	0.002 130 70	201.0400	0.001 937 08
0.00	102.8605	0.002 480 74	170.7150	0.002 381 50	213.8251	0.002 165 00
0.05	171.9084	0.002 756 41	186.5325	0.002 046 15	225.7043	0.002 405 59

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.48 Section *id.* 0mc.18095616		Diamèt. de la conduite 0m.50 Section *id.* 0mc.10635		Diamèt. de la conduite 0m.55 Section *id.* 0mc.2375835	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	180.9562	0.003 046 50	106.3500	0.002 024 72	237.5835	0.002 658 84
1.05	190.0040	0.003 351 28	206.1675	0.003 217 23	240.4627	0.002 024 75
1.10	199.0518	0.003 670 40	215.0850	0.003 523 66	261.3418	0.003 203 33
1.15	208.0900	0.004 004 20	225.8025	0.003 844 03	273.2210	0.003 494 57
1.20	217.1474	0.004 352 43	235.6200	0.004 178 33	285.1002	0.003 798 48
1.25	226.1952	0.004 715 16	245.4375	0.004 526 55	296.9704	0.004 115 05
1.30	235.2430	0.005 002 41	255.2550	0.004 888 71	308.8585	0.004 444 28
1.35	244.2908	0.005 484 17	265.0725	0.005 264 80	320.7377	0.004 786 18
1.40	253.3386	0.005 800 43	274.8900	0.005 654 81	332.6160	0.005 140 74
1.45	262.3864	0.006 311 21	284.7075	0.006 058 76	344.4961	0.005 507 96
1.50	271.4342	0.006 746 50	204.5250	0.006 476 64	356.3752	0.005 887 85
1.55	280.4820	0.007 106 30	304.3425	0.006 008 45	368.2544	0.006 280 41
1.60	280.5290	0.007 660 61	314.1600	0.007 354 10	380.1336	0.006 685 62
1.65	298.5777	0.008 139 44	323.9775	0.007 813 86	392.0128	0.007 103 51
1.70	307.6255	0.008 632 77	333.7950	0.008 287 46	403.8910	0.007 534 05
1.75	316.6733	0.009 140 61	343.6125	0.008 774 09	415.7711	0.007 077 26
1.80	325.7211	0.009 662 97	353.4300	0.009 276 45	427.6503	0.008 433 13
1.85	334.7689	0.010 199 83	363.2475	0.000 701 84	439.5295	0.008 001 67
1.00	343.8167	0.010 751 21	373.0650	0.010 321 16	451.4086	0.009 382 87
1.05	352.8645	0.011 317 10	382.8825	0.010 864 41	463.2878	0.000 876 73
2.00	361.0123	0.011 897 49	392.7000	0.011 421 59	475.1670	0.010 383 26
2.05	370.9601	0.012 402 40	402.5175	0.011 992 70	487.0462	0.010 002 46
2.10	380.0070	0.013 101 82	412.3350	0.012 577 75	498.9253	0.011 434 31
2.15	389.0557	0.013 725 75	422.1525	0.013 176 72	510.8045	0.011 078 83
2.20	398.1036	0.014 364 19	431.0700	0.013 789 62	522.6837	0.012 536 02
2.25	407.1514	0.015 017 14	441.7875	0.014 416 45	534.5629	0.013 105 87
2.30	416.1902	0.015 684 61	451.6050	0.015 057 22	546.4420	0.013 688 38
2.35	425.2470	0.016 366 58	461.4225	0.015 711 91	558.3212	0.014 283 56
2.40	434.2048	0.017 063 06	471.2400	0.016 380 54	570.2004	0.014 801 40
2.45	443.3420	0.017 774 06	481.0575	0.017 063 09	582.0796	0.015 511 00
2.50	452.3004	0.018 490 56	490.8750	0.017 759 58	503.9587	0.016 145 07
2.55	461.4382	0.019 230 58	500.6025	0.018 460 09	605.8370	0.016 790 00
2.60	470.4860	0.010 994 11	510.5100	0.019 194 34	617.7171	0.017 440 40
2.65	470.5338	0.020 763 15	520.3275	0.010 032 62	620.5962	0.018 120 56
2.70	488.5816	0.021 546 70	530.1450	0.020 684 82	641.4754	0.018 804 39
2.75	407.6204	0.022 344 75	530.0625	0.021 450 06	653.3546	0.019 500 87
2.80	506.6772	0.023 157 33	549.7800	0.022 231 03	065.2337	0.020 210 03
2.85	515.7251	0.023 984 41	550.5975	0.023 025 03	677.1120	0.020 931 84
2.90	524.7729	0.024 826 00	560.4150	0.023 832 96	688.0021	0.021 666 32
2.95	533.8207	0.025 682 10	570.2325	0.024 654 81	700.8713	0.022 413 47
3.00	542.8685	0.026 552 72	580.0500	0.025 490 60	712.7505	0.023 173 28

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.00 Section *id.* 0mc.282744		VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.60 Section *id.* 0mc.282744	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.		Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	m.	l.	m.
0.01	2.8274	0.000 001 30	1.00	282.7440	0.002 437 27
0.02	5.6540	0.000 003 24	1.05	296.8812	0.002 681 02
0.03	8.4823	0.000 005 50	1.10	311.0184	0.002 036 39
0.04	11.3098	0.000 008 34	1.15	325.1556	0.003 203 36
0.05	14.1372	0.000 011 58	1.20	330.2028	0.003 481 04
0.06	16.0646	0.000 015 20	1.25	353.4300	0.003 772 13
0.07	19.7021	0.000 010 47	1.30	367.5072	0.004 073 02
0.08	22.6195	0.000 024 10	1.35	381.7044	0.004 387 33
0.00	25.4470	0.000 020 21	1.40	395.8416	0.004 712 34
0.10	28.2744	0.000 034 77	1.45	409.9788	0.005 048 07
0.11	31.1018	0.000 040 80	1.50	424.1160	0.005 307 20
0.12	33.0293	0.000 047 30	1.55	438.2532	0.005 757 04
0.13	36.7567	0.000 054 26	1.60	452.3004	0.006 128 40
0.14	39.5842	0.000 061 68	1.65	466.5276	0.000 511 55
0.15	42.4116	0.000 060 57	1.70	480.6648	0.006 906 21
0.16	45.2390	0.000 077 92	1.75	494.8020	0 007 312 49
0.17	48.0665	0.000 080 74	1.80	508.0302	0.007 730 37
0.18	50.8030	0.000 000 02	1.85	523.0764	0.008 150 86
0.10	53.7214	0.000 105 77	1.00	537.2136	0.008 600 07
0.20	56.5488	0.000 115 08	1.05	551.3508	0.000 053 67
0.22	62.2037	0.000 137 70	2.00	565.4880	0.009 517 00
0.25	70.6860	0.000 173 00	2.05	570.6252	0.000 003 02
0.28	70.1683	0.000 214 38	2.10	503.7624	0.010 481 46
0.30	84.8232	0.000 243 62	2.15	607.8006	0.010 080 60
0.32	00.4781	0.000 274 72	2.20	022.0308	0 011 401 35
0.35	08.9604	0.000 324 85	2.25	630.1740	0.012 013 71
0.38	107.4427	0.000 370 16	2.30	650.3112	0.012 547 08
0.40	113.0976	0.000 417 69	2.35	604.4484	0.013 003 20
0.42	118.7525	0.000 458 08	2.40	078.5856	0.013 050 45
0.45	127.2348	0.000 522 14	2.45	602.7228	0.014 219 24
0.48	135.7171	0.000 590 39	2.50	706.8600	0.014 709 65
0.50	141.3720	0.000 638 20	2.55	720.9972	0.015 801 66
0.55	155.5002	0.000 765 87	2.60	735.1344	0.016 905 28
0.60	169.6464	0.000 005 15	2.65	740.2716	0.016 610 51
0.65	183.7836	0.001 056 03	2.70	763.4088	0.017 237 35
0.70	107.0208	0.001 218 53	2.75	777.5460	0.017 875 80
0.75	212.0580	0.001 392 63	2.80	701.6832	0.018 525 86
0.80	226.1952	0.001 578 34	2.85	805.8204	0.010 187 52
0.85	240.3324	0.001 775 66	2.90	810.0576	0.010 860 80
0.90	254.4696	0.001 084 59	2.05	834.0048	0.020 545 08
0.05	268.0068	0.002 205 12	3.00	848.2320	0.021 242 17

La table précédente va nous servir à résoudre quelques problèmes dont la solution serait assez longue avec le secours seul de la table de Prony ou de celle de M. de Saint-Venant (161).

164. 1er Problème. *Soit* (problème déjà résolu n° 162) *à déterminer le diamètre d'une conduite de 5000 mètres de longueur, capable de débiter 60 mètres cubes d'eau par heure ou 16,666 7 litres par seconde, la charge totale étant de 5 mètres, ce qui fait 0m,001 par mètre de longueur de conduite.*

On cherche, en considérant successivement les différents diamètres de la table, quel est le plus petit de ces diamètres capable de dépenser le volume 16l,666 7 par seconde, ou le volume immédiatement supérieur, sans que la charge correspondante dépasse 0m,001, et ce plus petit diamètre est celui qu'il convient d'employer.

Considérant le diamètre 0m,20, on voit que la dépense 17l,278 8, immédiatement supérieure à 16l,666 7, correspond à une charge de 0m,002 297 61 par mètre de longueur de conduite; le diamètre 0m,20 est donc trop faible.

Pour le diamètre 0m,22, la dépense 17l,106 0 correspondant à la charge 0m,001 424 03, ce diamètre n'est pas encore assez grand.

Pour le diamètre 0m,24, la dépense 17l,190 8 correspondant à la charge 0m,000 947 91, ce diamètre est plus que suffisant pour produire le débit 16l,666 7 sous une charge de 0m,001; mais l'excès de dépense qu'il pourra produire compensera les dépôts dont il a déjà été question (162). Puisque le diamètre 0m,24 satisfait aux conditions du problème, à plus forte raison les diamètres supérieurs devront-ils y satisfaire.

165. 2e Problème. Ce problème et ceux qui suivent ne sont autre chose que la réunion de plusieurs analogues au précédent (164), et se résolvent en suivant la même marche que pour ce premier.

Il s'agit, au moyen d'une machine à vapeur, d'élever par heure 60 mètres cubes d'eau à 25m,00 de hauteur au-dessus du niveau du puisard des pompes; la longueur totale de la conduite, qui a un diamètre constant sur toute sa longueur, est de 1000 mètres; on demande quel diamètre on devra donner à la conduite, sachant qu'elle n'alimente aucun branchement sur son parcours.

Si on n'avait à considérer que les frais d'établissement de la conduite, il est évident que l'on devrait adopter le plus petit diamètre capable de débiter 60 mètres cubes par heure ou 16l,666 7 par seconde, sans que la vitesse moyenne dépasse 3m,00 par seconde; mais comme la charge à vaincre et par suite la force de la machine augmentent à mesure que le diamètre de la conduite diminue, il faut, pour résoudre le plus convenablement possible le problème en question, dresser un tableau des prix d'établissement des différentes conduites et des machines qui leur sont nécessaires, et faire entrer dans la comparaison de ces prix les

intérêts des sommes dépensées ainsi que les dépenses annuelles de charbon et d'entretien ; il faut avoir égard aussi au renouvellement du matériel.

On doit donc se rendre compte de la force des machines pour les différents diamètres susceptibles d'être employés. Le plus petit des diamètres que l'on peut employer est $0^m,09$, lequel, pour une dépense de $16^l,858\,6$, exige une charge de $0^m,110\,736\,76$ par mètre de longueur de conduite. La charge, à très-peu près exacte, pour le volume $16^l,666\,7$ que doit dépenser la conduite, s'obtient par une simple proportion : on remarque que pour la différence $0^l,318\,1$, des deux dépenses successives $16^l,858\,6$ et $16^l,540\,5$ de la table, la différence de charge par mètre de longueur de conduite est $0^m,110\,736\,76 - 0^m,106\,635\,22 = 0^m,004\,101\,54$, ou à peu près $0^m,004\,1$: alors, pour la différence $16^l,858\,6 - 16^l,666\,7 = 0^l,1919$, on conclura la différence de charge x de la proportion

$$0{,}318\,1 : 0{,}191\,9 :: 0{,}004\,1 : x,$$

qui donne $x = 0^m,002473$. La charge correspondant à la dépense $16^l,666\,7$ est donc $0^m,110\,736\,76 - 0^m,002\,473 = 0^m,108\,26$ environ. Pour les 1000 mètres de longueur de conduite, la charge sera alors de $108^m,26$, auxquels il faut encore ajouter les 25 mètres d'élévation de l'eau, ce qui donne une charge totale définitive de $133^m,26$. L'effet utile de la machine, non compris le frottement des pompes, sera donc de $133{,}26 \times 60000 = 7995600$ kilogramètres par heure, ce qui correspond à une force de $\frac{7995600}{270000} = 29{,}61$ chevaux (35).

En opérant de la même manière pour les diamètres successifs $0^m,12$, $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$, on obtient les résultats du tableau suivant :

DIAMÈTRE de la conduite.	CHARGE TOTALE due au mouvement de l'eau et à son élévation.	EFFET utile de la machine en kilog. m., par heure.	FORCE de la machine en chevaux.
m	m		
0.09	108.26+25=133 26	7 995 600	29.61
0.12	26.07+25= 51.07	3 063 960	11.35
0.15	8.70+25= 33.70	2 022 000	7.49
0.20	2.15+25= 27.15	1 629 000	6.03
0.25	0.74+25= 25.74	1 544 400	5.72

166. 3° Problème. *Distribution d'eau au moyen d'une conduite* AE *de diamètre uniforme sur toute sa longueur* (fig. 20), *alimentant sur son parcours différents écoulements* B, C, D *et* E *de débits déterminés : chacun de ces écoulements alimente, par exemple, un certain nombre de bornes-fontaines.*

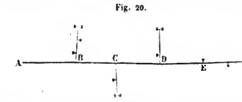


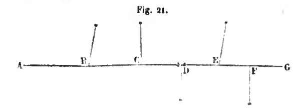
Fig. 20.

Il faut que le diamètre de la conduite soit tel, que la charge à l'origine de chaque écoulement soit suffisante pour que l'eau s'élève au moins à quelques décimètres au-dessus des orifices des bornes-fontaines alimentées par ces écoulemeuts. Pour déterminer ce diamètre, on lui suppose une première valeur qu'on préjuge convenable ; on détermine la perte de charge qui a lieu du point A, origine de la conduite, au point B, premier écoulement ; ce que l'on fait en opérant comme au problème premier (164) ; car ayant le débit de cette partie AB, débit qui est égal à celui de toute la conduite, et son diamètre, la table du n° 163 donne la perte de charge par mètre ; laquelle, multipliée par la distance des points A et B, qui est connue, donne la perte totale de charge pour la partie de conduite comprise entre ces deux points. Retranchant cette perte de la charge théorique au point B, c'est-à-dire de la différence de hauteur du point B et du niveau de l'eau dans le réservoire alimentaire placé au point A, on a la charge réelle au point B ; charge qui doit être capable d'élever l'eau aux bornes-fontaines alimentées par l'écoulement B. On détermine ensuite la perte de charge qui a lieu du point B au point C ; pour cela, on opère comme de A en B, en remarquant seulement que le volume débité par cette portion de conduite est égal à celui débité par la partie AB, moins le volume qui s'écoule par le branchement B. Ayant la perte de charge qui a lieu de B en C, on l'ajoute à celle trouvée pour la partie AB, ce qui donne la perte totale de A en C ; laquelle, retranchée de la charge théorique en C, donne la charge réelle en ce point ; charge qui doit aussi être suffisante pour produire l'écoulement par les bornes alimentées par le branchement C. On opère ensuite pour les parties successives CD, DE de la conduite comme pour les précédentes, et on voit si la charge à l'origine de tous les branchements est suffisante pour produire un écoulement convenable par les bornes. Si cette charge n'était pas suffisante, on essayerait un diamètre plus grand, et si on avait un excès de pression, on vérifierait un diamètre plus petit.

167. 4° Problème. *Déterminer les diamètres à donner aux deux portions d'une conduite recevant l'eau par ses deux extrémités* A *et* G

(fig. 21), *et alimentant sur son parcours différents écoulements* B, C, D, E, F *de débits déterminés.*

Fig. 21.



Dans ce cas, des écoulements sont alimentés par l'eau venant de A, et les autres par l'eau venant de G, et généralement un des écoulements reçoit une partie de son eau de l'extrémité A et l'autre partie de l'extrémité G ; ainsi, par exemple, la quantité d'eau fournie par l'extrémité A est égale à la dépense des écoulements B, C, $\frac{1}{4}$ D, et celle fournie par l'extrémité G, à la dépense des écoulements F, E, $\frac{3}{4}$ D.

Le diamètre de chacune des parties AD et DG de la conduite doit être tel, que la charge à l'entrée de chaque branchement soit suffisante pour le débit de ce branchement, et, de plus, que la charge soit la même à l'entrée du branchement D pour chacune des portions de la conduite. On est donc obligé de procéder par tâtonnement pour arriver à la solution du problème. Pour cela, on assigne une première valeur à chacun des diamètres de AD et DG, et on détermine, en opérant comme dans le cas précédent (166), quelle est la charge à l'entrée de l'écoulement D. Si cette charge est la même pour les deux écoulements en sens contraire, et que la distribution se fasse convenablement par tous les branchements alimentés par chaque portion de la conduite principale, on adopte les diamètres supposés. Si au contraire ces conditions ne sont pas remplies, on augmente ou on diminue un ou les deux diamètres, selon que l'indiquent les résultats trouvés, et on continue le tâtonnement jusqu'à ce qu'on arrive à des diamètres satisfaisant aux conditions exigées.

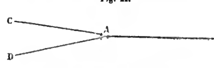
168. 5e PROBLÈME. *Distribution d'eau au moyen d'une conduite de différents diamètres.*

Une telle distribution se compose d'une suite de conduites de diamètres différents, mais uniformes entre deux écoulements successifs, entre lesquels aussi le débit est constant. On résoudra donc ce problème d'après la marche suivie n° 166, en déterminant la perte de charge due à chaque conduite partielle en ayant égard, non-seulement à la diminution du débit, mais aussi à celle du diamètre. De là on conclura la charge effective à l'origine de chaque branchement, charge qui devra

être suffisante pour produire un écoulement convenable dans chacun d'eux.

169. 6e PROBLÈME. *Une conduite* AB (fig. 22) *est alimentée à son extrémité* A *par deux conduites* CA *et* DA *de débits donnés ; il s'agit de déterminer les diamètres de ces conduites.*

Fig. 22.



On assigne une valeur au diamètre de AB ; comme on connaît le débit de cette partie de la conduite, on obtient au moyen de la table du n° 163 la perte de charge qui lui est due, et comme on a la différence de niveau des points A et B, on conclut quelle devra être la charge effective au point A. Assignant ensuite des valeurs aux diamètres des conduites CA et DA, comme on connaît le volume d'eau que doit amener chacune de ces conduites, au moyen de la table on obtient la perte de charge pour chacune d'elles, et on en conclut la charge effective au point A ; charge qui doit être la même pour les deux conduites, et égale à celle qui a été calculée nécessaire pour produire un écoulement satisfaisant dans AB ; s'il n'en était pas ainsi, on modifierait convenablement le diamètre d'une ou de deux, ou même des trois conduites partielles.

Si la quantité d'eau fournie par chacune des conduites CA et DA n'était pas déterminée, on pourrait faire varier, outre les diamètres des conduites, les quantités d'eau fournies, mais de manière que la somme de ces quantités soit égale à la dépense de AB. Dans tous les cas, la charge au point A doit être la même pour chacune des conduites CA et DA, et suffisante pour produire un écoulement convenable dans la partie AB.

170. *Pouce d'eau ou pouce de fontainier*. On évalue quelquefois le débit d'une conduite d'eau en pouces d'eau ou pouces de fontainier, qui équivaut à un débit de 0,000 222 166 de mètre cube par seconde, ou d'environ 13,33 litres par minute, ou encore de 19,195 3 mètres cubes par 24 heures.

La *ligne d'eau* est la 144e partie du pouce d'eau, et le *point d'eau*, la 144e partie de la ligne d'eau.

171. *Borne-fontaine*. Une borne-fontaine débite moyennement 0,001 78 de mètre cube par seconde, ce qui équivaut à peu près à 8 pouces de fontainier. Son orifice est placé à 0m,50 au-dessus du sol, et il suffit, pour son alimentation, que l'eau puisse s'élever de quelques décimètres au-dessus de cet orifice.

172. *Perte de charge due aux coudes*. Navier, en discutant les résultats obtenus par Du Buat, a posé la formule

$$p = \frac{v^2}{2g}\left(0.0039\frac{1}{r} + 0.0186\right)\frac{a}{r}.$$

p perte de charge due au coude;
v vitesse moyenne de l'eau dans le tuyau;
$\frac{v^2}{2g}$ hauteur correspondant à la vitesse v (131);
r rayon de l'arc formé par l'axe du coude;
a développement de l'arc formé par l'axe du coude.

Cette formule fait voir que la perte de charge p est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne v et à la longueur de l'arc a; qu'elle est fonction du rayon r, et indépendante du diamètre du tuyau; enfin qu'elle est d'autant plus petite que r est plus grand.

Pour les diamètres de conduite successifs :

0m,05 et 0m,06, 0m,08 et 0m,10, 0m,15, 0m,20, 0m,25 et au-dessus,

les valeurs de r sont respectivement :

0m,45, 0m,50, 0m,75, 1m,00, 1m,50.

Avec ces proportions, la perte de charge due aux coudes est très-faible près de la perte due au frottement de l'eau contre les parois des tuyaux, et comme en pratique les coudes sont généralement peu nombreux, on peut ordinairement négliger leur iufluence sur la perte de charge.

173. *Proportions des tuyaux de conduite.* L'épaisseur à donner à un tuyau cylindrique soumis à une certaine pression intérieure est donnée par la formule

$$e = \frac{hd}{2R}.$$

e épaisseur du tuyau en millimètres;
h pression intérieure du tuyau, exprimée en mètres de hauteur d'eau;
d diamètre du tuyau en mètres;
R résistance à la traction de la matière dont est composé le tuyau, en kilogrammes par millimètre carré de section.

Pour la fonte, la résistance absolue à la traction varie de 12 à 14 kil. par millimètre carré de section; mais en pratique il convient, pour la stabilité des constructions, de réduire la traction à 3 et même à 2 kil. Adoptant 2 kil. dans le cas des tuyaux de conduite, la formule précédente devient

$$e = \frac{hd}{4} = 0.25hd,$$

et si on exprime e en mètres, on a

$$e = 0.000\,25hd.$$

Cette formule donne encore des épaisseurs inférieures à celles adoptées en pratique; cela tient à la difficulté d'obtenir sans défauts des tuyaux en fonte de $1^m,50$ à $2^m,50$ de longueur.

Dans les arts, les épaisseurs des tuyaux en fonte se déterminent à l'aide de la formule

$$e = 0^m,01 + 0,02d.$$

e épaisseur du tuyau en mètres;
d diamètre du tuyau en mètres.

C'est à l'aide de cette formule qu'ont été déterminées les épaisseurs des tuyaux consignés dans le tableau suivant, qui donne en outre les dimensions des autres parties de ces tuyaux. On doit essayer ces tuyaux à une pression de 10 atmosphères.

DIAMÈTRES des tuyaux.	LONGUEURS totales des tuyaux		ÉPAISSEURS des tuyaux.	EMBOITEMENTS			BRIDES			
	avec emboîtement.	sans emboîtement.		diamètres intérieurs.	longueurs.	épaisseurs.	diamètres extérieurs.	épaisseurs en collet.	fruits.	nombres de trous.
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
0.05	1.60	1.50	0.0110	0.090	0.10	0.015	0.195	0.016	0.003	3
0.06	*id.*	*id.*	0.0112	0.100	*id.*	*id.*	0.205	*id.*	*id.*	*id.*
0.08	2.12	2.00	0.0116	0.120	0.12	0.016	0.225	0.020	0.004	4
0.10	*id.*	*id.*	0.0120	0.140	*id.*	*id.*	0.245	0.024	*id.*	*id.*
0.15	2.65	2.50	0.0130	0.195	0.15	0.020	0.301	0.025	0.005	6
0.20	*id.*	*id.*	0.0140	0.245	*id.*	*id.*	0.355	0.030	*id.*	*id.*
0.25	*id.*	*id.*	0.0150	0.300	*id.*	*id.*	0.410	0.035	*id.*	*id.*
0.30	*id.*	*id.*	0.0160	0.350	*id.*	*id.*	0.470	0.040	*id.*	8
0.35	1.70	2.50	0.0170	0.410	0.20	0.025	0.530	0.045	*id.*	*id.*
0.40	*id.*	*id.*	0.0180	0.460	*id.*	*id.*	0.585	*id.*	*id.*	0
0.45	*id.*	*id.*	0.0190	0.510	*id.*	*id.*	0.650	*id.*	*id.*	*id.*
0.50	*id.*	*id.*	0.0200	0.560	*id.*	*id.*	0.700	*id.*	*id.*	12
0.60	*id.*	*id.*	0.0220	0.660	*id.*	*id.*	0.800	*id.*	*id.*	*id.*

Les tuyaux de $0^m,10$ et au-dessous sont garnis, sur leur longueur, de 2 filets de $0^m,08$ de largeur sur $0^m,0035$ à $0^m,004$ de saillie, et ceux d'un diamètre supérieur, de 3 filets ayant $0^m,08$ de largeur sur $0^m,005$ de saillie.

Les cordons placés aux extrémités des tuyaux ont, pour le petit bout, un diamètre égal au 1/10 environ de la longueur de l'emboîtement dans lequel ils pénètrent; pour le gros bout, c'est-à-dire pour l'emboîtement, ce diamètre est égal à l'épaisseur de l'emboîtement. Ces cordons font une saillie égale à leur rayon sur le corps du tuyau ou de l'emboîtement.

A l'aide du tableau précédent, il sera facile de déterminer, par analogie, les proportions à donner à un tuyau en fonte d'un diamètre quelconque.

Les diamètres des tuyaux dont on fait usage à Paris ayant été fixés en anciennes mesures, ils diffèrent en partie, comme le fait voir le tableau suivant, de ceux du tableau précédent ; mais les autres parties sont proportionnées de la même manière.

Poids des tuyaux coulés horizontalement, anciens modèles employés à Paris.

DIAMÈTRES des tuyaux.	EMBOITEMENT et cordon.	BRIDE et cordon.	EMBOITEMENT et bride.	DEUX emboitements.	DEUX brides.
m.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
0.081	50	47	54	57	51
0.108	75	72	81	84	78
0.135	125	122	132	135	120
0.162	150	141	158	162	140
0.100	200	180	209	220	108
0.216	230	218	242	254	230
0.250	283	271	307	310	285
0.300	355	331	371	305	347
0.325	385	357	402	430	374
0.350	416	385	435	466	404
0.400	509	470	532	571	493
0.500	687	610	714	782	646
0.600	820	755	850	910	790

174. (Les résultats de ce numéro nous ont été communiqués par notre camarade, M. Corot.) Depuis quelques années on coule les tuyaux debout. Avec cette précaution, on peut diminuer les épaisseurs; ainsi, au lieu de les calculer avec la formule du numéro précédent, on adopte celles fournies par la suivante, dans laquelle les lettres ont les mêmes significations.

$$e = 0^m,008 + 0,016d.$$

La fig. 23 représente la coupe de deux tuyaux de $0^m,50$ de diamètre, nouveaux modèles, l'un à emboitement et l'autre à bride. Les cotes expriment des millimètres.

Fig. 23.

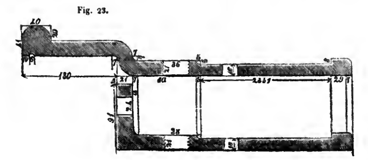


Tableau des proportions et des poids des tuyaux coulés debout, nouveaux modèles employés à Paris. Ce tableau contient en outre les poids des coudes, et ceux des tubulures que l'on fait venir sur les tuyaux pour les branchements de la conduite. Les rayons des coudes sont proportionnés comme au n° 172. Pour les tuyaux de 0m,25 de diamètre et au-dessus, on ne fait plus de coudes au 1/4 de circonférence.

DIAMÈTRES des tuyaux.	DIAMÈTRES des emboîtements.	ÉPAISSEURS.	EMBOITEMENT et cordon.	BRIDE ET CORDON.	EMBOITEMENT et bride.	DEUX EMBOITEMENTS.	DEUX BRIDES.	COUDES 1/4 de circonférence.	COUDES 1/8 de circonférence.	COUDES 1/12 de circonférence.	POIDS A AJOUTER pour une tubulure.
m	m	m	k	k	k	k	k	k	k	k	k
0.060	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	8
0.081	0.120	0.0095	56	54	63	66	60	28	18	»	11
0.108	0.148	0.0100	78	75	85	90	83	40	25	»	13
0.135	0.175	0.0100	95	90	105	110	100	60	40	»	16
0.162	0.203	0.0105	120	115	125	130	122	»	»	»	21
0.190	0.232	0.0110	145	140	155	160	150	»	»	»	23
0.216	0.259	0.0115	170	165	180	185	175	»	»	»	27
0.250	0.298	0.0120	210	195	220	235	205	»	»	»	30
0.300	0.350	0.0130	270	255	285	300	265	»	»	»	36
0.325	0.376	0.0130	300	285	315	335	295	»	»	»	»
0.350	0.401	0.0135	335	315	350	370	330	»	»	»	42
0.400	0.453	0.0145	390	370	420	440	400	»	»	»	50
0.500	0.556	0.0160	530	500	545	590	540	»	500	»	»
0.600	0.660	0.0180	710	670	760	790	725	»	»	515	»

Pour les tuyaux de 0m,081 *à* 0m,216 *de diamètre :*

1° L'épaisseur à l'emboîtement est égale à l'épaisseur du corps du tuyau plus 0m,004; cette surépaisseur se prolonge au delà des parties arrondies, sur une longueur de 0m,08;

2° Le cordon de l'emboîtement a 0m,01 de rayon;

3° Le cordon du petit bout a 0m,016 de longueur et 0m,006 de saillie sur le corps du tuyau; il convient d'arrondir l'arête extérieure sur un rayon égal à celui des petites parties arrondies intérieure et extérieure, du fond de l'emboîtement, rayon que donne le dessin du tuyau projeté;

4° La profondeur de l'emboîtement, y compris la petite partie arrondie du fond, est 0m,11;

5° Le diamètre intérieur de l'emboîtement est tel qu'il y a 0m,004 de jeu tout autour du cordon du petit bout qui y pénètre; de sorte que l'épaisseur du joint est 0m,006 + 0m,004 = 0m,010.

Pour les tuyaux de 0m,25 *à* 0m.60 *de diamètre :*

1° La surépaisseur de l'emboîtement est de 0m,005, et elle se prolonge, comme pour les petits tuyaux, de 0m,08 au delà des parties arrondies;

2° Le cordon de l'emboîtement a 0m,02 de rayon;

3° Le cordon du petit bout a 0m,036 de longueur et 0m,008 de saillie;

4° La profondeur de l'emboîtement, y compris la petite partie arrondie, est $0^m,13$;
5° Le joint a $0^m,008 + 0^m,004 = 0^m,012$ d'épaisseur.

Pour tous les tuyaux :

1° La longueur, comptée du petit bout au fond de l'emboîtement, est $2^m,50$; de sorte que la longueur totale est $2^m,50 + 0^m,11 = 2^m,61$ pour les tuyaux de $0^m,081$ à $0^m,216$ de diamètre, et $2^m,50 + 0^m,13 = 2^m,63$ pour ceux de $0^m,25$ à $0^m,60$. Ces longueurs sont celles nécessaires pour que chaque bout représente en place $2^m,50$ de conduite;
2° Le prolongement sur une longueur de $0^m,08$ de la surépaisseur de l'emboîtement remplace les filets des anciens modèles;
3° La longueur de la grande partie arrondie formant le fond de l'emboîtement, mesurée suivant l'axe du tuyau, est égale à l'épaisseur à l'emboîtement;
4° Quand il y a une bride, elle remplace simplement l'emboîtement et la grande partie arrondie formant le fond de l'emboîtement. Comme l'épaisseur de la bride à l'extérieur est égale à cette grande partie arrondie ou à l'épaisseur de l'emboîtement, et que le fruit de la bride, de l'arête intérieure à l'arête extérieure, est de $0^m,003$, il en résulte que la longueur totale d'un tuyau avec bride d'un bout et cordon de l'autre est $2^m,50 + 0^m.003$;
5° Sur tout le contour intérieur de l'emboîtement, à $0^m,01$ du bout, règne un petit refouillement de $0^m.006$ de diamètre destiné à retenir le plomb formant le joint.
6° La longueur du joint en plomb est de $0^m.04$; le reste en dessous est rempli de corde goudronnée.

Diamètres des tuyaux :

m m m m m m m m m m m m m
0,081, 0,108, 0,135, 0,162, 0,19, 0,216 à 0,25, 0,30, 0,325, 0,35, 0,40, 0,50, 0,60.

Nombres de boulons des brides :

3, 4, 5, 6, 6, 6, 8, 8, 9, 0, 12, 14.

Distances des trous aux arêtes extérieures des brides :

m m m m m m m m m m m m
0,012, 0,012, 0,014, 0,015, 0,015, 0,016, 0,016, 0,016, 0,018, 0,018, 0,018, 0,018.

Les tiges des boulons sont carrées et ont $0^m,021$ de côté pour les tuyaux de $0^m,25$ et au-dessous, et $0^m,024$ pour ceux de $0^m,30$ et au-dessus.

TABLEAU DES PRIX :

1° *D'un mètre linéaire de conduite en fonte, compris fourniture et pose;*
2° *D'un mètre linéaire de conduite en tôle et bitume, compris fourniture et pose;*
3° *Des robinets-vannes.*

DIAMÈTRES.	1° MÈTRE LINÉAIRE DE CONDUITE EN FONTE.						2° MÈTRE	3° ROBINET-VANNE.		
	Poids du tuyau de $2^m,50$.	Poids du mètre linéaire.	Prix du kilogr. de fonte.	Dépense pour fourniture de fonte.	Prix de pose du mètre linéaire. (1)	Prix du mètre linéaire compris fourniture et pose.	courant de conduite en tôle et bitume. (2)	Fourniture. (3)	Pose. (4)	Total.
m.	k.	k.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr
0.081	56	22.40	0.20	4.48	4.00	8.48	5.00	152	13	165
0.108	78	31.20	*id.*	6.24	4.50	10.74	6.30	183	17	200
0.135	95	38.00	*id.*	7.60	5.00	12.60	7.80	244	21	265
0.162	120	48.00	*id.*	9.60	5.50	15.10	9.45	295	25	320
0.190	145	58.00	*id.*	11.60	6.00	17.60	11.60	334	26	360
0.216	170	68.00	*id.*	13.60	7.00	20.60	13.70	352	28	380
0.250	210	84.00	*id.*	16.80	8.00	24.80	15.90	430	30	460
0.30	270	108.00	*id.*	21.60	9.00	30.60	21.10	469	41	510
0.325	300	120.00	*id.*	24.00	9.50	33.50	24.00	»	»	»
0.35	335	134.00	*id.*	26.80	10.00	30.80	27.50	572	48	620
0.40	390	156.00	*id.*	31.20	12.00	43.20	31.00	685	55	740
0.50	530	212.00	*id.*	42.40	15.00	57.40	43.50	940	65	1005
0.60	710	284.00	*id.*	56.80	18.00	74.80	»	1185	75	1260

(1) N° 23 du bordereau de la fontainerie (travaux neufs).
(2) Tarif Chameroy pour 1852.
(3) Prix extraits du tableau dressé, le 20 mars 1851, par l'ingénieur de la 1[re] section.
(4) N° 27 du bordereau de la fontainerie (travaux neufs).
(5) N° 58 *id.*

VENTOUSE FLOTTEUR.	
	fr.
Fourniture.	67
Pose (5). . .	8
	75

175. Les tuyaux en plomb, que l'on emploie quelquefois, se faisaient avec des plaques de plomb que l'on soudait après les avoir roulées; mais maintenant on les étire tant que le diamètre ne dépasse pas une certaine limite. Leur longueur est de $3^m,90$. Pour les joindre entre eux, on taille leurs extrémités en sifflet, afin que l'un pénètre un peu dans l'autre, et on fait un nœud de soudure, lequel, pour les diamètres successifs de tuyaux :

$$0^m,04,\quad 0^m,06,\quad 0^m,08,\quad 0^m,11,\quad 0^m,16,\quad 0^m,19,\quad 0^m,22,$$

pèse respectivement :

$$2^k,25,\quad 3^k,50,\quad 4^k,50,\quad 6^k,00,\quad 9^k,00,\quad 11^k,00,\quad 13^k,00.$$

Pour calculer l'épaisseur à donner à un tuyau en plomb, on peut se servir de la formule donnée n° 173,

$$e = \frac{hd}{2R}.$$

Pour le plomb, la ténacité absolue n'est que de 1^k,30 par millimètre carré de section; c'est 10 fois moins que pour la fonte, ce qui conduit à faire leur épaisseur 10 fois plus grande que pour la fonte placée dans les mêmes circonstances; mais comme on fait facilement, même sous une faible épaisseur, les tuyaux en plomb homogènes dans toutes leurs parties, on peut s'écarter de cette règle. D'après Bélidor, un tuyau en plomb de 0^m,33 de diamètre et 0^m,02 d'épaisseur peut résister à une pression de 3 atmosphères. Les tuyaux du parc de Versailles ont 0^m,035 d'épaisseur pour un diamètre de 0^m,65.

On fait encore des tuyaux en bois. Leur résistance à la traction est très-grande; mais ils sont promptement détruits par la pourriture. Les bois employés à la confection de ces tuyaux sont le chêne, l'aulne et l'orme.

176. *Service des eaux dans les villes.* Il existe à Paris 5 réservoirs établis sur des points culminants pour alimenter les quartiers qui les environnent et faciliter l'arrivée de l'eau en cas d'incendie : ce sont les réservoirs du Panthéon, 3 bassins; Racine, 3 bassins; Vaugirard, 2 bassins; Monceau, 1 bassin, et Ménilmontant, 1 bassin. La capacité réunie de ces réservoirs s'élève à 28 millions 1/2 de litres d'eau.

Le nombre des fontaines de Paris est de 94, parmi lesquelles on compte 26 fontaines monumentales.

La Seine, les eaux d'Arcueil, le canal de l'Ourcq et le puits de Grenelle alimentent ces fontaines par les établissements ci-après : 31 par l'aqueduc de ceinture, 19 par le réservoir de Chaillot, 16 par le pont Notre-Dame, 7 par l'aqueduc d'Arcueil, 7 par le réservoir de Monceau, 7 par le canal de l'Ourcq, 3 par la pompe à feu de Chaillot, 2 par le puits de Grenelle, 1 par le bassin Saint-Victor, et 1 par le réservoir de Vaugirard.

A ces fontaines publiques, on doit ajouter 14 fontaines marchandes, 62 poteaux d'arrosement, 63 bouches de service pour incendie, 54 bouches d'eau sous trottoirs destinées, avec les bornes-fontaines, au lavage de la voie publique, et enfin 1844 bornes-fontaines.

Le total des appareils de distribution d'eau pour l'usage public et sur toute la surface de la ville s'élève à 2033. Ces appareils, y compris les concessions particulières, y fournissent par jour une quantité de 69 480 000 litres d'eau, ce qui fait à peu près 69 litres d'eau par jour et par individu (extrait d'un rapport de M. Sari à la commission municipale).

D'un rapport sur un projet de distribution d'eau dans Madrid, de

MM. Eugène Flachat et E. Lorentz, nous extrayons les chiffres suivants (Compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils):

Dans la marine, où le pain est fait d'avance, où l'on ne lave le linge et ne nettoie à fond le navire qu'en relâche, la consommation de chaque homme est réglée à environ 3 litres par jour; on peut donc estimer à environ 5 litres la limite inférieure de la consommation d'eau.

M. R. Thom évalue à environ 58 litres par tête et par jour, la quantité d'eau maximum que réclame une abondante et large distribution.

Pour une famille d'ouvriers aisés et très-propres, composée de la mère, du père, d'une fille nubile et de deux autres enfants, M. Gravatt estime ainsi la consommation hebdomadaire (enquête de 1844) :

Lavage des légumes	63 litres.
Thé et lavage des ustensiles	64
Cuisson des légumes et autres mets	64
Propreté personnelle	127
Lavage des planchers des deux chambres, une fois par semaine	45
Blanchissage du linge et des vêtements	227
Arrosage d'un jardinet	45
Total	635 litres.
Soit par jour et par tête	18 litres.
Auxquels on peut ajouter :	
Pour water-closet, environ	4
Bains	3
Usages industriels (à Londres ils n'exigent que 8 litres)	15
Total	40 litres.

Dans ce dernier chiffre tout est compris, sauf les quantités nécessaires aux besoins des animaux et à ceux d'irrigations des cours, jardins et façades de maisons, dépenses d'ailleurs exceptionnelles; d'autre part, on a forcé tous les chiffres ci-dessus.

Plus récemment, la commission générale de salubrité, dans son rapport sur l'alimentation de Londres, estime que pour subvenir aux plus larges besoins des particuliers, y compris l'eau des grands consommateurs et industriels, ainsi que celle que demaudera l'abolition complète des fosses, il faudra, par tête et par jour, moins de. . . . . 51 litres.

A ce nombre, elle ajoute pour nouveaux bains, nouvelles industries et éventualités. 11,80

En tout. 62,80

Dans le Midi, la chaleur surexcite la consommation; dans le Nord, la fumée, la boue, créent des besoins de propreté qui n'ont pas une influence beaucoup moindre. Cependant MM. Flachat et Lorentz ont adopté 70 litres pour Madrid; ils jugent ce chiffre de beaucoup au-dessus des besoins les plus larges, mais il offre l'avantage de donner

toute sécurité relativement à de grands développements industriels, à l'extension de l'usage des bains et à l'imprévu.

A Paris, les fontaines jaillissantes débitent 13200 mètres cubes d'eau par jour; mais, d'après M. Darcy, il convient de porter ce chiffre à 18000 mètres cubes, ce qui fait 18 litres par jour par habitant.

D'une enquête faite avec soin, il résulte qu'à Londres le volume total nécessaire, par tête et par jour, pour satisfaire largement aux besoins publics est :

Arrosage et ébouage des rues.	23 litres 60 c.
Incendies et éventualités.	8 »
Total.	31 litres 60 c.

Soit moitié du volume 62^{l},80 attribué, par le projet, aux besoins des particuliers.

MM. Flachat et Lorentz ont adopté, dans le projet de Madrid, part égale, 70 litres, pour les besoins d'édilité, quantité qui les assure d'avoir largement pourvu à l'écoulement des fontaines jaillissantes. Ce chiffre de 70 litres approche de ceux des projets de Lyon et de Cette.

De toutes les considérations qui précèdent, il résulte que la consommation de 150 litres par jour et par habitant est plus que suffisante pour tous les besoins d'une ville.

TABLEAU des quantités d'eau distribuées dans quelques villes, par jour et par habitant.

NOMS DES VILLES.	POPULATIONS.	EAU FOURNIE.	COURS D'EAU sur lesquels sont les villes.
		litres.	
Rome ancienne.	1 200 000	1 084	Tibre.
Rome moderne.	136 000	1 105	Tibre.
Besançon.	30 000	530	Canal.
New-York. . . .	312 000	568	»
Marseille.	185 000	470	»
Carcassonne. . .	15 500	400	Aude et canal du Languedoc.
Philadelphie. . .	240 000	225	Schuylkill et Delaware.
Dijon.	25 500	180	Ouche et Torrent de Suzon.
Richemond. . . .	20 000	180	James.
Lyon.	206 000	Projet 145	Rhône, Saône et sources.
Glasgow.	395 000	113	Clyde et 3 canaux.
Londres.	1 924 000	112	Tamise et New-River.
Gênes.	90 000	110	Bisagno, Rochetta, Polievera.
Cette.	18 000	Projet 106	»
Narbonne. . . .	10 500	85	Canal.
Manchester. . .	180 000	84	2 canaux et 2 petits cours d'eau.
Toulouse.	52 000	80	Garonne et canal.
Munich.	90 000	80	Isar et canaux.
Genève.	50 000	74	Lac Léman et Rhône.
Paris.	1 000 000	69	Seine, Ourcq, Bièvre.

MOTEURS HYDRAULIQUES.

177. Pour l'établissement d'un moteur hydraulique, la chute dont on peut disposer, dite *chute disponible*, est égale à la chute totale du cours d'eau, c'est-à-dire à la différence de niveau de l'eau en aval de la première des usines d'amont et de l'eau dans le canal d'aval de l'usine à établir, diminuée de la pente nécessaire à l'écoulement de l'eau entre les deux usines et de celle nécessaire au chenal qui conduit l'eau dans le canal d'aval (157).

178. *Niveau des eaux.* Dans l'établissement d'un canal ou d'un barrage, on ne peut tenir les eaux à un niveau supérieur à 0m,20 en contre-bas des terrains environnants, à moins qu'on ne soit autorisé à construire des digues le long des rives.

179. *Roues à aubes planes recevant l'eau en dessous, ou roues à choc.* Pour que, dans une roue verticale à aubes planes recevant l'eau en dessous, il y ait équilibre dynamique, on doit avoir théoriquement, d'après M. Belanger,

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}m(V-v)^2 - \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mgh'\left(\frac{V}{v} - \frac{v}{V}\right).$$

m masse de l'eau dépensée par seconde (22);
V vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue;
v vitesse que conserve l'eau en quittant la roue, ou vitesse du centre d'impulsion des aubes;
h' épaisseur de la lame fluide à sa sortie de la roue;
$\mathcal{T}_m$ quantité de travail produite par seconde;
$\frac{1}{2}mV^2$ puissance vive que possède l'eau au moment de son choc sur la roue;
$\frac{1}{2}m(V-v)^2$ perte de puissance vive due au choc de l'eau sur la roue;
$\frac{1}{2}mv^2$ perte de puissance vive due à la vitesse que conserve l'eau en quittant la roue.

En négligeant, comme on l'a fait jusqu'à présent, le terme $-\frac{1}{2}mgh'\left(\frac{V}{v} - \frac{v}{V}\right)$, dû à l'élévation de niveau de l'eau en passant de la vitesse V à celle v, on a

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}m(V-v)^2 - \frac{1}{2}mv^2, \text{ d'où } \mathcal{T}_m = mv(V-v).$$

Ce qui fait voir que, pour une même valeur de V, $\mathcal{T}_m$ sera le plus grand possible quand le produit $v(V-v)$ sera maximum; ce qui existera quand on aura $v = V - v$ ou $V = 2v$; car si on considère V comme

étant le diamètre d'un cercle, $v(V - v)$ sera égal au carré d'une perpendiculaire abaissée d'un point de la circonférence sur le diamètre qu'elle divise en deux segments v et $V - v$ (*Int.*, 559); or cette perpendiculaire, et par suite son carré, aura la plus grande valeur possible, quand elle passera au centre, ce qui donnera bien $v = V - v$. De plus, en examinant de quelle manière varie la perpendiculaire en faisant varier v et par suite $V - v$, on voit qu'elle ne change pas sensiblement tant que v reste compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de V. Ainsi, pour ce genre de roues, l'effet maximum aura lieu quand la vitesse de la roue sera moitié de la vitesse avec laquelle l'eau vient la frapper, et cet effet maximum ne diminuera pas sensiblement tant que v restera compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de V.

Remplaçant dans le second membre de la formule précédente v par $\frac{V}{2}$, on a

$$T_m = \frac{mV^2}{4} = \frac{Ph}{2}.$$

$P = mg$ poids d'eau dépensé par seconde (22);
$h = \frac{V^2}{2g}$ chute effective, que l'on prend égale à la différence de niveau de l'eau en amont de la vanne et derrière la roue (130);

Cette dernière formule fait voir que l'effet utile maximum n'est que moitié du travail total dépensé.

Dans la dernière valeur de T_m, on fait $V^2 = 2gh$, ce qui suppose que la hauteur du niveau de l'eau dans le bief supérieur, au-dessus du centre de gravité de l'ouverture de la vanne, est égal à h, et que la vitesse de l'eau n'est pas diminuée entre la vanne et la roue (131).

Les pertes d'eau et les divers frottements, qu'on a négligés dans l'établissement des formules précédentes, font que le travail utile effectif n'est que les 0,60 environ du travail moteur théorique; ainsi on a seulement

$$T_m = 0{,}60\,\frac{Ph}{2} = 0{,}30Ph.$$

Avec de bonnes dispositions de roues, on peut augmenter cet effet utile.

La théorie donne $v = \frac{1}{2}V$ pour le maximum d'effet; mais les roues construites fournissent ordinairement $v = \frac{2}{5}V$.

L'effet utile de ce genre de roues est faible; mais comme il est indépendant du diamètre de la roue, que l'on peut faire varier de 2 mètres

à 8 mètres, et que de plus on peut, sans altérer sensiblement cet effet utile, faire varier la vitesse dans des limites étendues, ces roues sont convenables quand on a besoin d'une grande vitesse directe de rotation, et surtout quand on est obligé de faire varier cette vitesse dans des limites étendues.

Il convient, pour que la marche de la roue soit régulière, que sa vitesse au centre d'impulsion des aubes ne soit pas inférieure à un mètre.

Le jeu entre les aubes et le coursier ne peut guère être inférieur à $0^m,01$, et il s'élève parfois à $0^m,02$ et $0^m,03$.

Il convient d'incliner la vanne, afin de rapprocher, autant que possible, son ouverture du point d'action de l'eau sur la roue; ce qui diminue les frottements de l'eau dans le coursier, et augmente le coefficient de dépense de la vanne (144).

D'après M. Belanger, on peut conclure qu'il convient de donner au fond du coursier, entre la vanne et la roue, une inclinaison de 1/12 à 1/15; de le faire concentrique à la roue sur une étendue au moins égale au double de l'intervalle de deux aubes consécutives, divisée en deux parties égales par la verticale passant par l'axe de la roue; de prolonger ensuite le fond du coursier par un plan de $1^m,50$ à 2 mètres de longueur se raccordant avec le canal de fuite; ce plan étant incliné de manière qu'au point où il se raccorde avec le canal de fuite, la profondeur d'eau soit égale ou un peu supérieure au double de la levée de la vanne. On incline ensuite le canal de la fuite de 1/15 sur une longueur de 10 mètres, et, de plus, si les localités le permettent, on l'élargit graduellement de $0^m,50$ de chaque côté pour cette longueur de 10 mètres; il faut éviter de faire cet élargissement d'une manière brusque.

D'après M. Belanger, il y a théoriquement avantage de faire plonger les aubes, quelle que soit leur vitesse, tant que leur enfoncement dans l'eau ne dépasse pas l'épaisseur de la veine fluide, et même plus si la vitesse est très-grande. La pratique a confirmé cet avantage, tant que la partie plongée des aubes ne dépasse pas les 2/3 ou les 3/4 de l'épaisseur de la lame fluide, et elle a appris, en outre, qu'il n'y avait aucun inconvénient à faire plonger les aubes de toute l'épaisseur de la lame. D'après cela, il convient donc de tenir le fond du coursier au-dessous du niveau de l'eau en aval de la roue.

La hauteur des aubes varie entre 2 fois 1/2 et 3 fois la levée verticale de la vanne, et leur distance, mesurée sur la circonférence passant par leur centre, entre 1 fois et 1 fois 1/2 leur hauteur.

Le nombre des aubes doit être le nombre pair le plus rapproché de 6 fois le diamètre moyen de la roue exprimé en mètres; la difficulté de placer convenablement ce nombre d'aubes, à cause de la position des bras, peut seule le faire modifier.

D'après Deparcieux, une inclinaison de 20 à 22° des aubes sur le

rayon, du côté qu'elles reçoivent l'eau, augmente un peu l'effet utile de la roue; cependant d'autres expériences de Bossut avaient confirmé le contraire, et en pratique il ne convient guère de les incliner que quand la roue est sujette à être noyée, parce qu'alors cette disposition permet aux aubes de sortir plus facilement de l'eau.

La chute maxima convenable à ce genre de roues est $1^m,30$; pour des chutes plus grandes, le choc de l'eau contre la roue donne une perte de puissance vive considérable.

Application. La dépense est 700 litres d'eau par seconde, et la chute $1^m,06$; quel est le travail moteur que rendra la roue?

Remplaçant P et h par leurs valeurs dans l'expression de $\mathcal{T}_m$, on a

$$\mathcal{T}_m = 0,30 \times 700 \times 1,06 = 222^{km},6.$$

Ce qui fait $\frac{222,6}{75} = 2,97$ chevaux-vapeur.

Ayant (131) $V = \sqrt{2gh} = 4^m,56$,

la vitesse de la roue, au centre d'impulsion des aubes, doit être de $2^m,28$.

La roue devant faire 9 tours par minute, par exemple, son rayon r, mesuré au centre d'impulsion des aubes, se déduit de l'équation

$$2\pi r \times 9 \quad \text{ou} \quad 2 \times 3,14 \times r \times 9 = 2^m,28 \times 60,$$

d'où

$$r = \frac{2,28 \times 60}{2 \times 3,14 \times 9} = 2^m,42.$$

180. *Roues à aubes courbes recevant l'eau en dessous, dites roues à la* Poncelet (*fig.* 24).

Pour que dans une roue à la Poncelet il y ait équilibre dynamique, on doit avoir

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2} m V^2 - \frac{1}{2} m (V - 2v)^2.$$

m	masse de l'eau dépensée par seconde;
V	vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue;
v	vitesse de la roue;
$V - 2v$	vitesse absolue que conserve l'eau en quittant l'aube;
$\mathcal{T}_m$	quantité de travail produite par seconde;
$\frac{1}{2} m V^2$	puissance vive que possède l'eau à son arrivée sur la roue;
$\frac{1}{2} m (V - 2v)^2$	perte de puissance vive due à la vitesse que conserve l'eau;

$\mathcal{T}_m$ sera maximum quand la perte de puissance vive $\frac{1}{2} m (V - 2v)^2$ sera nulle, c'est-à-dire quand on aura $V = 2v$, ce qui donne

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2} m V^2 = Ph. \qquad \text{(page 166).}$$

Formule qui fait voir que le travail utile théorique est égal au travail dépensé, et double de celui produit par les roues à aubes planes (179).

Les formules précédentes ne peuvent être vraies qu'autant que l'eau ne produit pas de choc contre les aubes, c'est-à-dire, que toute l'eau arrive tangentiellement à ces aubes; ce qui est impossible en pratique, à cause de l'épaisseur de la lame fluide, quelle que soit du reste la forme des aubes. Il y a donc toujours choc, d'où il résulte une perte de puissance vive, qui a été négligée dans les formules. Jamais non plus l'eau ne reste sans vitesse après avoir quitté la roue. On a aussi négligé les pertes d'eau, ainsi que le frottement de l'eau et celui des tourillons.

Malgré toutes ces causes de diminution de l'effet utile, l'expérience prouve qu'avec de bonnes dispositions de roues on obtient

$\mathcal{T}_m = 0{,}65Ph$	pour des chutes de	$1^m{,}20$ et au-dessous.
$\mathcal{T}_m = 0{,}60Ph$	id.	$1{,}30$ à $1^m{,}50$.
$\mathcal{T}_m = 0{,}55$ à $0{,}50Ph$	id.	$1{,}80$ à $2{,}00$.

Sauf des circonstances particulières, il convient de n'employer ces roues que pour des chutes inférieures à $1^m{,}50$, et elles sont surtout avantageuses pour des chutes qui ne dépassent pas 1 mètre.

D'après les expériences de M. Poncelet, on doit avoir en pratique $v = 0{,}55V$.

La forme de l'aube peut être une courbe quelconque, pourvu qu'elle soit continue; le plus souvent c'est un arc de cercle. Dans tous les cas, elle doit être normale, ou à peu près, à la circonférence intérieure de la roue au point où elle la rencontre, et faire avec la circonférence extérieure un angle de 25 à 30°.

La vitesse de la roue étant environ moitié de celle d'arrivée, il suffit, pour que l'eau ne saute pas par-dessus les aubes quand la roue est en marche, que la distance entre les circonférences intérieure et extérieure de la roue soit le 1/4 de la hauteur de chute, plus l'épaisseur de la lame d'eau à son arrivée sur la roue; mais, pour éviter que l'eau ne jaillisse encore dans la roue, il convient de la faire égale au 1/3 de la chute, plus l'épaisseur de la lame fluide. (Consulter la règle page 172.)

L'écartement des aubes à la circonférence extérieure de la roue varie de $0^m{,}25$ à $0^m{,}30$. Leur plus courte distance doit être moindre que la levée minimum de la vanne. Leur nombre doit être divisible par celui des bras.

La levée verticale de la vanne varie de $0^m{,}20$ à $0^m{,}30$, et on peut la porter à $0^m{,}40$ dans les cas de fortes dépenses d'eau et de petites longueurs de roues.

L'écartement intérieur des couronnes doit être de $0^m{,}06$ à $0^m{,}10$ plus grand que la largeur de l'orifice de la vanne.

Le fond du bief supérieur est à peu près horizontal; on le raccorde avec le coursier, dont la pente varie entre 1/10 et 1/15, depuis la vanne jusqu'à son point de tangence avec la circonférence extérieure de la roue. A partir de ce point, le coursier est concentrique avec la roue jusqu'à une distance, en aval de la verticale passant par l'axe de la roue, comprise entre 1 fois et 1 fois 1/2 l'intervalle des deux aubes consécutives. Enfin le coursier se termine par un ressaut de 0m,30 à 0m,40 de profondeur, dont le sommet doit être au niveau des eaux moyennes dans le canal de fuite. La largeur du coursier, entre la vanne et la roue, est égale à celle de l'ouverture de la vanne; la partie qui touche la roue est élargie de manière à envelopper les couronnes en laissant un centimètre de jeu de chaque côté. Le coursier doit conserver cette largeur jusqu'à une hauteur de 0m,10 au-dessus du point le plus élevé de l'ouverture de la vanne.

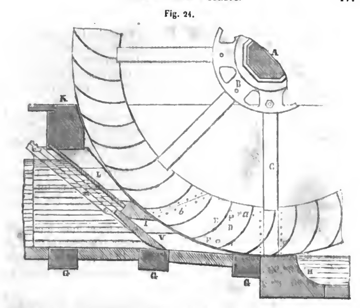
L'inclinaison de la vanne varie de un à deux de base pour deux de hauteur; ce qui porte, en arrondissant les côtés verticaux du pertuis, le coefficient de la dépense à 0,74 pour la première inclinaison, et à 0,80 pour la seconde (144).

Les aubes peuvent, sans que l'effet utile soit sensiblement diminué, être noyées d'une hauteur égale à l'épaisseur de la lame fluide.

La figure 24 représente, à l'échelle de 2 centimètres pour mètre, la coupe d'une roue à la Poncelet, établie à Romilly par M. Ferry. Cette roue est de la force de 50 chevaux; la chute est 1m,30, et la dépense 4m.c.,810 par seconde. Par suite de considérations locales, le diamètre a été fixé à 5m,50, la longueur à 6m,04, et, à l'exception des tourteaux qui fixent les bras à l'arbre, qui sont en fonte, on a cru devoir faire tout en bois, même les aubes.

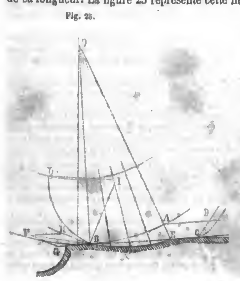
A arbre de la roue;
B tourteaux en fonte;
C bras, au nombre de 8;
D couronne en bois, de 0m.10 d'épaisseur et 0m.66 de hauteur;
E aubes, dont les bouts entrent dans des rainures courbes faites dans les couronnes;
F boulons serrant les couronnes contre les extrémités des aubes;
a extrémités des boulons F qui relient la couronne visible sur le dessin à la couronne qui est cachée. Cette roue, dont la longueur totale est de 6m.04, porte cinq couronnes qui la divisent en quelque sorte en quatre roues;
b vis à bois réunissant les madriers de 0m.05 d'épaisseur composant les couronnes;
V vanne; de même que la roue, elle est divisée dans sa longueur en quatre parties qui reçoivent simultanément le même mouvement. Des cloisons formées de madriers en bois divisent également le coursier d'amont en quatre parties;
m queues des vannes; elles sont en fer, et armées à leur partie supérieure de crémaillères en fonte;
L cloison en bois formant la retenue d'eau en s'appuyant sur les poutres K et I;
G, G madriers en bois consolidant le dallage formant le sol du coursier;
H ressaut formé par une bonne pierre de taille.

Fig. 24.



Les règles qui viennent d'être exposées servaient à l'établissement de ce genre de roues, lorsque M. Poncelet a proposé, pour éviter le choc de l'eau contre les aubes, de faire le coursier en spirale sur une partie de sa longueur. La figure 25 représente cette modification.

Fig. 25.



OA étant le rayon de la roue, on mène à la circonférence extérieure une tangente BC inclinée au 1/10 environ, qui représenterait le fond du coursier dans l'ancien tracé. On mène à cette tangente, à une distance égale à l'épaisseur de la lame fluide entre la vanne et la roue, une parallèle AD. On prolonge le rayon OA, et, à partir du point E, jusqu'au point B, le coursier prend la forme d'une spirale, c'est-à-dire

qu'il s'approche de la circonférence extérieure de la roue de quantités égales pour des angles égaux décrits autour du centre (*Int.*, 947).

Avec cette disposition, les différents filets fluides de la veine, qui conserve à peu près une épaisseur uniforme entre la vanne et la roue, décriront des spirales semblables, et entreront tous dans la roue sous le même angle, c'est-à-dire, sans choc, si le premier élément de l'aube est dirigé suivant cet angle.

Pour tracer l'aube, au point B on mène une tangente BF à la spirale (*Int.*, 951); on prend à une même échelle arbitraire BF = 1 et, sur le prolongement de EB, BG = 0,55, vitesse normale de la roue, et BH, parallèle à GF, est la direction à donner au premier élément de l'aube. On mène BI perpendiculaire à BH, et d'un point I, pris sur cette perpendiculaire, traçant un arc qui fasse avec la circonférence intérieure de la couronne un angle aigu très-rapproché d'un droit, cet arc détermine la forme de l'aube.

Des expériences de M. Morin sur une roue en fer et fonte à coursier spirale, de 2m,80 de diamètre, 0m,80 de longueur extérieure et 0m,75 de hauteur de couronnes; des chutes de 1m,20 à 1m,30 quand la roue était noyée et de 0m,90 quand elle ne l'était pas, et des levées de vanne de 0m,15, 0m,20, 0m,25 et 0m,277, il résulte :

1° Que le nouveau tracé du coursier et des aubes indiqué par M. Poncelet diminue beaucoup, sinon détruit entièrement, le choc de l'eau contre les aubes, et en facilite l'admission et la circulation;

2° Qu'avec cette disposition, une exécution soignée et un moment d'inertie suffisant (99), la roue acquiert la propriété, qu'elle ne possédait pas auparavant, de pouvoir marcher à des vitesses notablement supérieures ou inférieures à celle qui correspond au maximum d'effet, sans que l'effet utile s'éloigne considérablement de ce maximum;

3° Que le rapport de l'effet utile au travail total dépensé par le moteur s'est élevé à 0.60 ou 0.62 pour une roue en bois de 3m.20 de diamètre et d'une puissance de 6 chevaux, mise en expérience, et que pour des roues plus puissantes il s'élèverait probablement à 0.65;

4° Que l'effet utile augmente avec la levée de la vanne, et que les levées de 0m.20, 0m.25 et même 0m.35 paraissent favorables avec le nouveau coursier, pourvu que les couronnes soient proportionnées de façon que la capacité offerte par la roue à l'admission du liquide, à la vitesse du maximum d'effet, soit au moins 1 fois 1/2 le volume débité par la vanne, et il convient généralement de la prendre égale à 2 fois, surtout quand la roue est exposée à être noyée;

5° Que la vitesse, mesurée à la circonférence extérieure de la roue, doit être égale aux 0.50 ou 0.55 de celle $\sqrt{2gh'}$ due à la charge h' sur le sommet de l'orifice, et non sur le centre de l'orifice (144). La vitesse se calcule comme si le niveau de l'eau en aval de l'orifice s'élevait jusqu'à l'arête supérieure de cet orifice; ce qui a lieu jusqu'à un certain point, l'eau ne se dégageant pas librement;

6° Qu'à charges et levées de vannes égales, la roue rend un effet utile sensiblement le même quand elle est placée à 0m.12 au-dessus du niveau d'aval, ou quand elle est noyée de 0m.20 à 0m.25; ce qui tient en partie à ce que sa surface extérieure n'offrait pas de parties en saillie. Le sommet du ressaut du coursier doit être placé au niveau moyen de l'eau dans le canal de fuite, toutes

les fois qu'on n'aura pas à craindre des crues fréqnentes et durables, et qu'on pourra donner au canal de fuite, immédiatement auprès de la roue, une largeur égale à 5 ou 6 fois celle du coursier. Lorsque les localités forceront à ne donner au canal de fuite, près de la roue, qu'une largeur égale à celle du coursier, on fera un petit sacrifice sur la chute en plaçant le sommet du ressaut du coursier à $0^m.08$ ou $0^m.10$ au-dessus du niveau moyen des eaux d'aval. Dans ce dernier cas, la chute disponible, au lieu d'être la différence du niveau de l'eau dans le bief supérieur et dans le canal de fuite, comme dans le premier cas, est égale à la hauteur du niveau d'amont au-dessus du sommet du ressaut. Le ressaut doit avoir de $0^m.30$ à $0^m.40$ au moins, et plus s'il est possible de baisser le fond du canal de fuite;

7° Que quand la roue a été noyée de $0^m.357$ (moitié de la hauteur des couronnes), elle a encore rendu un effet utile égal aux 0.46 ou 0.47 du travail total dépensé, et qu'il y a lieu de penser qu'elle aurait encore marché convenablement si on avait pu la noyer davantage;

8° Que la vitesse de la roue à sa circonférence extérieure étant à celle d'arrivée de l'eau dans le rapport indiqué (5°), quel que soit le diamètre de la roue, il suffit, pour les cas ordinaires, c'est-à-dire pour les chutes de $0^m.90$, $1^m.20$ et $1^m.30$, d'établir entre la hanteur C des couronnes, mesurée suivant le rayon, et le diamètre D de la roue le rapport

$$\frac{C}{D} = 0,25.$$

Application. Soit à établir une roue à la Poncelet, pour une chute à peu près constante de $1^m,10$, et une dépense de 1200 litres par seconde.

Admettant 0,60 pour rapport du travail moteur à l'effet total dépensé, on a par seconde

$$\mathcal{T}_m = 0,60Ph = 0,60 \times 1200 \times 1,10 = 792^{km}.$$

La force de la roue en chevaux est

$$\frac{792}{75} = 10,56 \text{ chevaux.}$$

Prenant la levée verticale de la vanne égale à $0^m,25$, la charge sur l'arête supérieure de l'orifice sera

$$h' = 1,10 - 0,25 = 0^m,85.$$

Supposant la vanne inclinée à un de base pour un de hauteur, ce qui donne 0,80 pour coefficient de la dépense; l étant la dimension horizontale de l'orifice de la vanne, on a, puisque l'on peut placer, à cause de la constance du régime, le sommet du ressaut au niveau d'aval, et qu'il se trouve à peu près à la hauteur de l'arête inférieure de l'orifice de la vanne,

$$1,2 = 0,80 \times 0,25 \times l \times \sqrt{2 \times 9,8088 \times 0,85},$$

d'où

$$l = \frac{1,2}{0,80 \times 0,25 \times 4,083} = 1^m,47.$$

On prendra pour largeur de la roue, entre les couronnes, $L = 1^m,55$. La vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue étant $4^m,083$, la vitesse de la circonférence extérieure de la roue sera

$$v = 0,55V = 0,55 \times 4,083 = 2^m,25.$$

La capacité annulaire comprise entre les deux couronnes est (*Int.*, 603)

$$\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D-2C)^2}{4}\right)L. \qquad (a)$$

Faisant dans cette expression $D = 4C$, elle devient

$$3\pi LC^2.$$

La partie de cette capacité qui passe devant la vanne en une seconde est

$$3\pi LC^2 \times \frac{v}{\pi D} = 3\pi LC^2 \times \frac{v}{4\pi C} = 0,75LCv. \qquad (b)$$

Faisant ce volume égal à deux fois la dépense de la vanne, on a

$$2 \times 1,2 = 0,75LCv, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{2 \times 1,2}{0,75Lv}. \qquad (c)$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs relatives au cas qui nous occupe, on a

$$C = \frac{2 \times 1,2}{0,75 \times 1,55 \times 2,25} = 0^m,917,$$

et par suite

$$D = 0,917 \times 4 = 3,668.$$

On voit que cette règle conduit à des valeurs de C plus considérables que celles qu'on a employées jusqu'à présent (page 169) ; ce qui augmente la difficulté de construction de la roue; mais cela a l'avantage d'empêcher l'eau de jaillir dans la roue, non-seulement pendant la marche, mais aussi lors de la mise en train.

Il peut arriver que le diamètre de la roue soit fixé par des considérations locales. Supposons, par exemple, que la condition de tenir le niveau du sol de l'usine au-dessus du niveau des plus hautes eaux oblige de faire $D = 4^m,50$.

Pour avoir la valeur de C dans ce cas, on met, en effectuant les calculs, l'expression (*a*) sous la forme

$$\pi L(-C^2 + DC).$$

L'expression (*b*) devient

$$\pi L(-C^2 + DC) \times \frac{v}{\pi D} \quad \text{ou} \quad (-C^2 + DC) \times \frac{Lv}{D},$$

et l'équation (*c*),

$$(-C^2+DC)\times\frac{Lv}{D}=2\times1,2 \quad \text{ou} \quad C^2-DC=-\frac{2\times1,2\times D}{L\times v},$$

d'où (*Int.*, 438)

$$C=\frac{D}{2}-\sqrt{\frac{D^2}{4}-\frac{2\times1,2\times D}{L\times v}}.$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs, on a, pour le cas qui nous occupe,

$$C=\frac{4,5}{2}-\sqrt{\frac{4,5^2}{4}-\frac{2\times1,2\times4,5}{1,55\times2,25}}=0^m,85.$$

181. *Roues de côté* (*fig.* 26). Ces roues reçoivent l'eau un peu au-dessous de leur axe, et elles sont le plus exactement possible enveloppées d'un coursier circulaire sur toute la partie soumise à l'action de l'eau.

L'équilibre dynamique de ces roues donne, pour une seconde, en négligeant les pertes d'eau et le frottement des tourillons,

$$\mathcal{T}_m=Ph-\frac{P}{2g}(V^2+v^2-2Vv\cos\alpha)-\frac{P}{2g}v^2-t_r.$$

P poids total d'eau dépensé;
h chute totale ou différence du niveau de l'eau dans le bief supérieur et derrière la roue;
V vitesse moyenne du filet moyen au moment où il rencontre la roue ou l'eau qui se trouve déjà sur l'aube;
v vitesse de la roue et de l'eau à sa sortie des aubes;
α angle que font entre elles les deux vitesses V et v au point où le filet moyen rencontre la roue ou l'eau qui se trouve déjà sur l'aube;
$(V^2+v^2-2Vv\cos\alpha)=W^2$; W étant la résultante de la vitesse V et d'une vitesse égale et directement opposée à v, c'est-à-dire la vitesse relative de l'eau par rapport à la roue (*Int.*, 1014 et 1156); W est la perte de vitesse de l'eau. Les valeurs de V, v, α et W varient, pour tous les filets fluides et pour toutes les positions que prend l'aube par rapport aux positions de ces différents filets, depuis le point où l'auget admet chaque filet, jusqu'au point où il cesse de le recevoir; mais, afin de rendre possible l'évaluation des termes de la formule précédente, on supposera, en pratique, la veine fluide concentrée dans son filet moyen; on prendra V pour le point où le filet moyen rencontre la circonférence extérieure de la roue; v sera la vitesse de la circonférence extérieure de la roue, et sera, pour la détermination de W, dirigée suivant la tangente à cette circonférence extérieure, au point où le filet moyen la rencontre. Du reste, à l'aide d'une épure représentant l'auget dans ses différentes positions et le niveau de l'eau qui s'y trouve, on déterminerait facilement, d'une manière approximative, pour V, v, α et W, des valeurs moyennes plus exactes que les valeurs que nous venons de supposer;
$\mathcal{T}_m$ travail utile transmis par l'arbre de la roue;
Ph travail total dépensé;

$\frac{P}{2g}(V^2+v^2-2Vv\,cos\,\alpha)$ perte de travail due aux réactions et au frottemeot de l'eau cootre la roue;

$\frac{P}{2g}v^2$ perte de travail due à la vitesse que conserve l'eau;

t_r perte de travail due au frottement de l'eau contre le coursier, et que, jusqu'à uo certain point, on peut évaluer par la formule de Prony $RI=(av+bv^2)$, en considérant, dans ce cas, v comme étant sensiblement la vitesse du fond et non la vitesse moyenne (157). Quand les roues marchent avec une faible vitesse, $1^m.30$ et au-dessous, on peut négliger t_r.

La valeur de $\mathcal{T}_m$ peut être mise sous la forme

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{PV^2}{2g} + \frac{Pv}{g}(V\,cos\,\alpha - v) - t_r.$$

Ce qui fait voir que, pour une même valeur de Ph, $\mathcal{T}_m$ est d'autant plus grand que la vitesse V est plus petite. C'est afin de rendre V aussi petit que possible que l'on fait arriver l'eau sur la roue par une vanne en déversoir. Cette dernière formule fait voir aussi que $\mathcal{T}_m$ est d'autant plus grand que le terme $\frac{Pv}{g}(V\,cos\,\alpha - v)$ est plus grand; ce qui a lieu, pour des valeurs déterminées de V et v, quand cos α est maximam, c'est-à-dire égal à l'unité, et que par conséquent $\alpha = 0°$; c'est ce qu'on obtient pour les roues recevant l'eau tout à fait en dessous (179 et 180), ou ce qui aurait lieu dans une roue de côté si l'on pouvait faire arriver l'eau tangentiellement à la roue. Les valeurs de V et de α étant déterminées, le terme $\frac{Pv}{g}(V\,cos\,\alpha - v)$ est maximum quand on a $v = \frac{V\,cos\,\alpha}{2}$ (mêmes considérations que celles qui donnent $v = \frac{V}{2}$, n° 179, page 165).

En pratique, l'effet utile de ces roues est les 0,70 du travail total Ph dépensé, quand les chutes approchent de $2^m,50$, et il n'est que les 0,50 de Ph pour les chutes de $1^m,20$; de sorte qu'on peut considérer les 0,60 de Ph comme étant l'effet utile moyen produit par ce genre de roues; mais par des dispositions favorables, cet effet utile peut être augmenté.

Les considérations exposées plus haut conduisent à donner à la roue une vitesse $v = \frac{V\,cos\,\alpha}{2}$. Ordinairement on a en pratique $v = 0{,}45V$.

La vitesse convenable à ces roues est de $1^m,30$ par seconde; elle ne doit être ni inférieure à 1 mètre ni supérieure à 2.

L'abaissement de la vanne au-dessous du niveau de l'eau dans le bief supérieur doit être assez fort, de $0^m,20$ à $0^m,25$.

Avec ces ouvertures, la perte d'eau entre les aubes et le coursier, qui dépend de la largeur de la roue, est faible relativement au débit total de la roue, et le choc de l'eau contre les aubes n'est pas considérable.

Quand, par suite des sécheresses, la dépense d'eau diminue considérablement, il vaut mieux verser toute l'eau dans un seul compartiment de la roue, en n'abaissant qu'une partie de la vanne disposée à cet effet, que de la verser sur toute la roue en abaissant faiblement toute la vanne.

L'arête supérieure du col de cygne doit être placée à un niveau tel que, pendant les plus basses eaux, toute l'eau que doit débiter la roue puisse passer par-dessus. La vanne doit être telle que, quand elle est fermée, son arête supérieure se trouve à $0^m,10$ ou $0^m,12$ au-dessus du niveau de l'eau, et d'autant au-dessous de la crête du col de cygne.

La direction de la vanne se prend perpendiculaire au rayon de la roue mené un peu au-dessus du filet moyen du déversoir, lequel se trouve aux 3/5 environ de la profondeur de l'orifice. La vanne verse ainsi l'eau le plus près possible de la roue, sans qu'elle puisse, dans aucune position, être rencontrée par les aubes.

Ordinairement les aubes sont planes et dirigées suivant le rayon; mais il convient, afin de diminuer le choc de l'eau, de diriger leur premier élément suivant la direction de la vitesse W, et de les faire courbes comme pour les roues à la Poncelet. C'est ce que l'on fait quand elles sont en tôle; mais quand elles sont en bois, on les compose de deux parties planes, l'une dirigée suivant la direction de W et égale à peu près aux 2/3 de la profondeur de l'auget; l'autre inclinée à 45° sur le rayon, et raccordant la première avec la fonçure de la roue.

Les aubes sont en planches de chêne, et plus souvent d'orme, de $0^m,025$ d'épaisseur, lavées à la scie seulement, à l'exception du bord extérieur que l'on dresse et que l'on fait un peu en biseau, afin de laisser le moins de jeu possible entre les aubes et le coursier. Ce jeu ne doit pas dépasser 2 à 3 millimètres.

Le centre de la roue doit toujours être placé au-dessus du niveau de l'eau dans le bief supérieur, et s'il est possible à $0^m,50$ au-dessus de ce niveau. Avec cette précaution, la partie extérieure de l'aube peut être dirigée suivant le rayon de la roue, ce qui facilite la construction.

La capacité de l'aubage doit être à moitié remplie par l'eau, et ne doit jamais l'être à plus des deux tiers, quand le volume à débiter est constant. Dans tous les cas, cette capacité doit être suffisante pour débiter les plus grandes eaux.

On fait la longueur des aubes égale à la largeur de la vanne, et on ménage dans la fonçure de la roue des petits espaces libres, pour le dégagement et l'entrée de l'air quand l'eau entre dans l'aubage ou qu'elle en sort.

L'espacement des aubes peut varier de $0^m,33$ à $0^m,40$.

Il convient, d'après M. Belanger, pour utiliser le mieux possible la chute, de faire plonger les aubes dans l'eau d'aval de toute l'épaisseur

de la lame admise entre elles; de supprimer le ressaut brusque que l'on était dans l'habitude de faire; mais de prolonger le fond du coursier circulaire par un plan incliné au 1/12 environ, jusqu'à une distance de 3 ou 4 mètres de l'aplomb de la roue. Ce plan incliné conserve à l'eau la vitesse de la roue jusqu'à ce qu'elle quitte celle-ci, et en vertu de cette vitesse acquise, l'eau vient même refouler celle d'aval de manière à en débarrasser la roue, qui peut alors plonger, quand elle est au repos, d'une épaisseur supérieure à celle de la lame admise entre les aubes. Les joues latérales du coursier se prolongent en aval par des plans verticaux qui s'étendent jusqu'à l'extrémité du plan incliné, et on les élève à un niveau supérieur à celui des plus grandes eaux d'aval qui permet encore de marcher.

Les expériences suivantes, faites par M. Morin, sur une roue de la poudrerie du Bouchet, confirment les avantages des dispositions conseillées par M. Belanger. Cette roue a 4 mètres de diamètre, le plan incliné au 1/12 se prolonge jusqu'à 3m,50 environ en aval de la roue, et la capacité de l'auget est environ 0m.c.,228. M. Morin, en abaissant la vanne à différentes hauteurs, de manière à faire varier les dépenses d'eau et les vitesses, a observé à quelle distance horizontale en aval de l'axe de la roue se produisait le remous; dans tous les cas, l'eau entrait très-bien dans la roue.

ABAISSEMENT de la vanne.	VITESSE de la circonférence extérieure de la roue.	HAUTEUR dont la roue est noyée au repos.	ÉPAISSEUR de la lame d'eau dans l'auget du bas.	DISTANCE horizontale à laquelle se forme le remous.	RAPPORT du volume d'eau admis à la capacité des augets.
m. 0.20	m. 2.235	m. 0.35	m. 0.12	m. plus de 2.00	$\frac{1}{3.44}$
0.22	1.860	*id.*	0.12	1.45	$\frac{1}{3.47}$
0.24	2.140	*id.*	0.11	2.00	$\frac{1}{3.3}$
0.31	3.350	*id.*	0.11	2.50	$\frac{1}{3.73}$

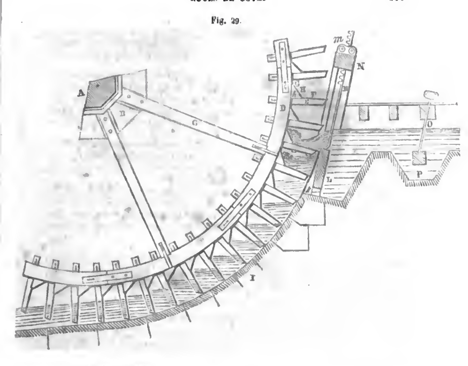
Le diamètre de ces roues ne peut guère avoir moins de 4 mètres.

Les roues de 4 mètres peuvent n'avoir que six bras par couronne; celles de 5 à 7 mètres en ont 8.

Les chutes auxquelles on peut appliquer ce genre de roues avec avantage ne peuvent être supérieures à 2m,50 ni inférieures à 1m,20.

La figure 26 représente, à l'échelle de 2 centimètres pour mètre, la coupe verticale perpendiculaire à l'axe d'une roue de côté. La chute est de 2m,475, et la dépense, de 1 200 litres par seconde (Extrait de la publication industrielle de M. Armengaud).

Fig. 29.



A arbre de la roue;
B tourteaux en fonte servant à fixer les bras à l'arbre;
C bras boulonnés sur les tourteaux et assemblés à tenons et mortaises dans les couronnes;
D couronnes en bois de chêne formées de plusieurs segments assemblés entre eux par des languettes et des équerres en fer;
E coyaux ou bracons en chêne ajustés dans les couronnes et retenus par des clefs en bois fortement serrées;
F aubes en bois d'orme ordinairement, ou de chêne; elles sont boulonnées sur les coyaux;
G contre-aubes cylindriques clouées sur la circonférence extérieure des couronnes;
H contre-aubes planes inclinées s'appuyant sur les aubes et les contre-aubes, et clouées sur des tasseaux *h;*
I coursier en pierre de taille, ou en briques, ou en bois de chêne; il s'élève latéralement sur toute la partie soumise à l'action de l'eau; au-dessus de cette limite, il est surmonté d'un côté par le mur de l'usine, appelé mur de *tampanne*, et de l'autre, par un mur qui supporte le palier de la roue, et que l'on appelle mur d'*éperon;*
k plaque de fonte, appelée *col de cygne*, formant le sommet du coursier et destinée à rapprocher le plus possible la vanne de la roue;
L vanne plongeante en bois de chêne;
M crémaillère servant à manœuvrer la vanne;
m pignon s'engreuant avec la crémaillère M;

N chapeau en bois supportant toute la transmission de mouvement de la vanne; il est assemblé à ses extrémités sur deux poteaux en bois portant des rainures dans lesquelles glisse la vanne. Les parties frottantes de la vanne et de ces rainures sont garnies de bandes de fer plates, afin de diminuer le frottement;

O barreaux en fer méplat de 0m.06 de large sur 0m.007 d'épaisseur, espacés de 0m.08 à 0m.09, de manière à former une grille en forme d'éperon qui règne sur toute la largeur du canal. Cette grille est destinée à arrêter les corps flottants qui pourraient détériorer la roue. Les barreaux O portent un anneau à leur partie supérieure, afin de pouvoir les retirer facilement quand on veut enlever les immondices;

P espace où s'accumulent les corps lourds, qui sans cela viendraient s'amonceler derrière la vanne plongeante et empêcher sa manœuvre. Malgré cette précaution, il faut encore laisser derrière cette vanne un espace libre, dont les dimensions permettent un nettoyage facile.

Dans le mur d'éperon, à l'extrémité de la fosse P, se trouve une vanne dont la crête règle le niveau supérieur des eaux, et qui descend jusqu'au fond de cette fosse, de sorte qu'en la levant, après avoir fermé la vanne plongeante L, les eaux entraînent les immondices accumulés dans la fosse P. C'est à cet instant qu'il convient de pouvoir enlever les barreaux O.

On construit encore des roues de côté dont la vanne est disposée avec charge sur le sommet; mais on ne doit employer cette disposition que quand la vitesse v de la roue est ou peut devenir trop grande pour que l'on puisse obtenir une vitesse V convenable au moyen d'un déversoir. Il peut arriver aussi que le niveau de l'eau dans le bief supérieur soit trop variable, ou que le fond du lit soit trop mobile pour pouvoir établir une vanne plongeante. Ces roues mixtes rendent un effet utile d'autant moindre, que la vanne est placée plus bas par rapport à la chute totale; cet effet est les 0,40 environ du travail total dépensé pour des vitesses de roues approchant de 3 mètres; si au contraire la vitesse de la roue n'est que de 1m,50, ce qui permet de baisser un peu moins la vanne, l'effet utile peut atteindre les 0,50 du travail total dépensé.

182. La machine à vapeur de Chaillot élève l'eau dans des bassins étagés à des niveaux différents. M. Mary a utilisé la chute de l'eau d'un des bassins dans l'autre pour faire mouvoir une roue hydraulique qui élève, à l'aide de pompes, une portion de l'eau dans un petit réservoir placé à un niveau convenable pour alimenter les quartiers élevés de Chaillot et du Roule.

La roue de M. Mary est une roue de côté, mais d'une construction particulière. Elle est formée de six aubes à peu près circulaires, de 0m,30 de diamètre, adaptées au pourtour d'un cylindre en fonte de 0m,11 de longueur et 1m,20 de rayon, formé par une couronne, et deux disques annulaires plans de 0m,30 de largeur, perpendiculaires à l'axe, et auxquels sont assujettis les six bras à fortes nervures de la roue. Pour séparer les eaux d'amont de celles d'aval, deux plaques en fonte, noyées en partie dans la maçonnerie, viennent s'appuyer sur les disques de la couronne, et forment, dans leur partie inférieure, les lèvres d'un

coursier annulaire en ciment de Vassy, calibré avec les aubes elles-mêmes, qui s'y emboîtent ainsi très-exactement. Ce coursier doit se prolonger au delà du plan vertical contenant l'axe de la roue, sur une longueur égale à la moitié de l'intervalle des aubes, et se terminer au niveau des eaux d'aval; du côté d'amont, il s'évase en entonnoir pour faciliter l'entrée de l'eau qui en couvre ainsi l'orifice, et y pénètre comme elle le ferait dans une conduite placée au fond d'un réservoir. Il résulte de cette disposition que l'eau de la retenue agit sur les palettes comme elle agirait sur un piston.

La roue ne perd à peu près rien de son effet utile quand l'eau s'élève en amont jusqu'au point de surmonter le cylindre sur lequel sont fixées les aubes.

La vitesse de la roue ne doit pas excéder $1^m,30$ par seconde.

Il paraîtrait que des expériences au frein auraient donné 0,825, 0,75, 0,824 et 0,85 pour cent d'effet utile; mais ces nombres paraissent exagérés.

M. Mary a fait construire une roue semblable à la prise d'eau de la Villette, pour fouler l'eau à Montmartre. Il y a six palettes portées par un cylindre de $0^m,57$ de longueur et 1 mètre de rayon; elles sont rectangulaires, arrondies aux angles, et ont $1^m,80$ sur $0^m,75$ suivant le rayon; elles sont formées d'une forte plaque de tôle sous laquelle est fixé un fort madrier en bois dont la forme imite jusqu'à un certain point celle de la proue d'un bateau. Malgré cette précaution, les aubes font tellement jaillir l'eau en y pénétrant, que le rendement en est considérablement diminué.

Cette roue, qu'il ne peut être convenable d'employer que quand la variation du niveau est considérable, n'est applicable qu'à un débit d'eau constant. Du reste, malgré les perfectionnements dont elle est susceptible, son prix élevé et sa difficulté d'exécution ne lui permettent guère de devenir un moteur applicable à l'industrie. Un avantage de cette roue, c'est qu'elle est un compteur assez fidèle.

183. *Roues à augets* (*fig.* 30, page 190). L'équilibre dynamique de ces roues a la même expression que pour les roues de côté (181). Ainsi on a, pour une seconde, en négligeant les pertes d'eau, le frottement contre le coursier, quand il y en a un, et le frottement de l'axe de la roue,

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) - \frac{P}{2g}v^2.$$

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'au n° 181.

La formule précédente peut être mise sous la forme

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{PV^2}{2g} + \frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v);$$

d'où on conclut, comme pour les roues de côté, que l'effet utile $\mathcal{T}_m$ augmente à mesure que $\frac{PV^2}{2g}$ diminue et que le terme $\frac{Pv}{g}$ $(V\cos\alpha - v)$ augmente; or, pour un même poids d'eau P, $\frac{PV^2}{2g}$ dépendant de la vitesse V, il faudra par conséquent rendre cette vitesse aussi petite que possible. Le terme $\frac{Pv}{g}$ $(V\cos\alpha - v)$ sera maximum quand, pour des valeurs déterminées de V et v, α sera nul; cet angle est toujours très-faible pour les roues recevant l'eau près du sommet. On voit aussi que, pour des valeurs déterminées de V et de α, le terme précédent sera maximum quand on aura $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$, d'où, en supposant $\cos\alpha = 1$, $v = \frac{V}{2}$. En pratique, la valeur de v peut varier des 0,30 aux 0,80 de V sans que l'effet utile soit sensiblement altéré; cependant, pour les petites roues, il convient de tenir v entre les 0,40 et 0,60 de V. Cette propriété des roues à augets de permettre une aussi grande variation de vitesse de rotation, les rend précieuses dans un grand nombre de circonstances: pour les marteaux, par exemple, où non-seulement la vitesse est grande, mais aussi doit varier à chaque instant entre des limites très-éloignées.

La vitesse des roues à augets ne doit pas être inférieure à 1 mètre pour que leur marche soit régulière, et elle peut atteindre 2 mètres pour les petites roues, et $2^m,50$ pour les grandes, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré. Pour les roues de marteaux, dont l'arbre porte la bague à cames, la vitesse atteint quelquefois 4 et 5 mètres, quoique leur diamètre ne soit que de 3 à 4 mètres; mais alors l'effet utile est diminué.

Les augets commençant à verser leur eau avant d'être arrivés au point le plus bas de la roue, il en résulte une perte d'effet utile d'autant plus forte que la hauteur de versement et la quantité d'eau versée sont plus grandes, et que par conséquent le diamètre et la vitesse de la roue sont plus grands. C'est afin d'éviter ce versement que l'on enveloppe quelquefois la roue d'un coursier, depuis le point où commence le versement jusqu'à celui où les augets sortent de l'eau.

Versement des augets. L'action réciproque de la pesanteur et de la force centrifuge fait que la surface du liquide contenu dans l'auget prend une forme cylindrique à section circulaire, dont le centre O est, d'après M. Poncelet, situé sur la verticale passant par l'axe de la roue, à une distance au-dessus de cet axe égale à

$$\frac{g}{\omega^2}.$$

$g = 9^m,8088$ accélération de vitesse due à la pesanteur ;
ω vitesse angulaire (98) ; elle est égale au quotient de la vitesse d'un point quelconque de la roue par la distance de ce point à l'axe, d'où l'on voit que la distance $\frac{g}{\omega^2}$ est indépendante du rayon de la roue.

Le centre commun O des courbes affectées par la surface du liquide contenu dans un auget étant connu, ainsi que la quantité d'eau contenue dans l'auget, il sera facile, à l'aide d'une épure, de déterminer le point où l'auget commencera à verser, puisqu'en ce point il devra encore contenir tout le fluide, et que la surface de celui-ci, qui a pour centre le point O, devra passer par l'arête extérieure de l'auget. A partir du point où l'auget commence à verser, la surface de l'eau passant toujours par l'arête extérieure de l'auget, il est facile de déterminer la quantité de liquide contenu dans l'auget en une position quelconque, et par suite la quantité de fluide perdue dans le passage de l'auget d'une position à une autre. Divisant alors la hauteur verticale h', du point où commence le versement au-dessus du niveau de l'eau derrière la roue, en un certain nombre pair de parties égales, 6 par exemple, et déterminant les quantités de liquide q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, perdues par l'auget quand il arrive successivement au point où commence le versement, au 1er, 2e, 3e, 4e, 5e points de division de h' et au bas de h', la perte de travail t_p due au versement du liquide est, en appliquant la formule de Thomas Simpson (*Int.*, 987),

$$t_p = \frac{h'}{6 \times 3}\left[q_0 + q_6 + 4(q_1 + q_3 + q_5) + 2(q_2 + q_4)\right].$$

Il est à remarquer que l'on aura $q_0 = 0$, puisque q_0 correspond au point où commence le versement ; q_6, q_5 et souvent q_4 seront égaux chacun au poids total de l'eau que reçoit l'auget en passant devant la vanne, l'auget étant vide quand il arrive aux points de division de h' correspondant à ces quantités.

Supposant qu'il passe n augets par seconde devant la vanne, la perte de travail par seconde due au versement sera nt_p.

Effet utile. Une roue à augets bien disposée, enveloppée d'un coursier et marchant à une faible vitesse, rend quelquefois un effet utile $\mathcal{T}_m =$ 0,80Ph ; mais avec les dispositions ordinairement usitées en pratique, la vitesse étant comprise entre 1 mètre et 2 mètres et les augets remplis à moitié, cet effet utile est généralement compris entre 0,70 et 0,75Ph, que les roues soient libres ou à coursier. Pour des vitesses plus grandes, et des augets remplis au delà des 2/3 de leur capacité, cet effet descend jusqu'à 0,60Ph, surtout pour les roues sans coursier. Enfin, pour les petites roues de marteaux marchant à grande vitesse, cet effet n'est quelquefois que de 0,37Ph ; ce faible rendement d'effet utile est dû à ce que l'eau tombant avec impétuosité sur la roue, qui marche très-vite,

elle rejaillit hors de la roue, ou est emportée hors des augets par la force centrifuge; c'est surtout dans ce cas que le coursier produit une augmentation sensible d'effet utile.

Augets. La capacité des augets est les 3/4 de celle de la couronne, et comme ils ne doivent être que moitié pleins, l'eau n'occupe donc que les 3/8 de la couronne.

On a

$$Q = kelV, \quad \text{d'où} \quad l = \frac{Q}{keV}.$$

Q volume d'eau dépensé par seconde;
k coefficient de la dépense (137);
e levée de la vanne;
l longueur de l'ouverture de la vanne;
V vitesse d'écoulement de l'eau.

Pour que l'air se dégage facilement des augets, on fait leur longueur, c'est-à-dire la distance des couronnes, égale à l augmentée de $0^m,10$ ou $0^m,12$; on doit avoir alors (pages 174 et 175),

$$Q = \frac{3}{8}\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D-2C)^2}{4}\right) L \times \frac{v}{\pi D}, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{8}{3}\frac{DQ}{Lv}}.$$

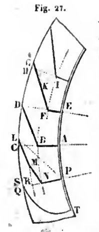
D diamètre extérieur de la roue;
C hauteur des augets, mesurée suivant le rayon; elle ne doit jamais dépasser $0^m.40$; on la fait ordinairement égale à $0^m.30$ ou $0^m.35$, et il vaudrait mieux ne lui donner que de $0^m.25$ à $0^m.28$, afin de faire agir l'eau sur la plus grande hauteur possible, et de diminuer sa vitesse relative W à son entrée dans la roue;
v vitesse de la circonférence extérieure de la roue;
$L = l + 0^m.10$ ou $0^m.12$, longueur des augets, mesurée entre les couronnes.

Avec une vitesse de $1^m,30$ à $1^m,40$, une roue à augets dépense convenablement de 70 à 100 litres d'eau par seconde et par mètre de longueur de roue.

La levée verticale de la vanne dépasse rarement $0^m,10$ à $0^m,12$; elle est souvent de $0^m,04$ à $0^m,05$ et quelquefois moins; cette faible épaisseur de la veine fluide rend facile son introduction dans les augets.

L'ouverture des augets, c'est-à-dire la plus petite distance de deux aubes consécutives, est égale, non compris l'épaisseur du bois qui est de $0^m,03$, à l'épaisseur de la veine fluide augmentée de $0^m,01$. La distance des aubes, mesurée suivant la circonférence extérieure de la roue, varie de $0^m,30$ à $0^m,40$; elle est ordinairement égale à la hauteur des couronnes. De cet écartement et du diamètre de la roue, on déduit le nombre des aubes, qui doit toujours être divisible par celui des bras; l'espace compris entre deux bras doit contenir un nombre entier d'augets.

Fig. 27.



La forme des augets est variable; mais le plus souvent son aube se compose de deux parties : l'une AB dirigée suivant le rayon de la roue (*fig.* 27), et égale à la moitié de la hauteur AC de la couronne; l'autre BD joignant le point B au point D extrémité du rayon passant par le fond de l'auget suivant.

M. d'Aubuisson fait le fond EF égal au 1/3 de ED, qui est ordinairement égal à 0m,30, et il mène FG faisant l'angle GFE de 110° à 118° suivant que les roues ont de 4 mètres à 12 mètres de diamètre; l'angle que fait GF avec la tangente à la circonférence extérieure au point G est de 31°, et il ne doit jamais dépasser 33°. On obtient cette disposition en pratique, en prenant simplement GH égal à 0m,04 ou 0m,05, quand, comme le conseille M. d'Aubuisson, on a eu soin de prendre la distance IF égale à 0m,32 environ. Dans tous les cas, la plus petite distance IK de deux aubes consécutives, non compris l'épaissseur des aubes, doit être au moins égale à l'épaisseur de la lame fluide augmentée de 0m,01. M. d'Aubuisson conseille de ne pas donner à IK moins de 0m,11 à 0m,12.

Quelquefois la partie extérieure de l'aube est brisée comme l'indique la forme LMNP; l'angle LPN varie de 50° à 60°, et celui que fait LM avec la tangente à la circonférence extérieure au point L, de 25° à 30°. On prend PN égal à la moitié de PQ, et PR compris ordinairement entre les 3/4 et les 5/6 de PQ. Cette forme a l'avantage de donner plus de capacité à l'auget, et de diminuer le choc de l'eau ainsi que la hauteur de déversement; mais la construction en est plus difficile.

La forme d'une courbe continue ST, dont l'élément extérieur fait un angle très-faible avec la tangente à la circonference extérieure au point S, est celle que l'on doit préférer, soit pour diminuer les réactions de l'eau, soit pour augmenter la capacité des augets, soit aussi pour leur faire conserver l'eau sur la plus grande hauteur de chute possible ; c'est la disposition adoptée pour les aubes en tôle, mais elle est presque impraticable pour les aubes en bois.

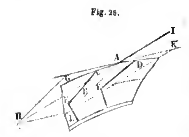


Fig. 28.

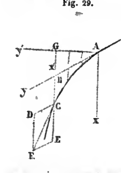
Direction du filet moyen. La forme de l'auget étant déterminée, il faut donner à la lame fluide une direction telle, que les différents filets qui la composent pénètrent dans l'auget en choquant le moins possible les deux faces de la partie extérieure de l'aube. En pratique, on déterminera la direction à donner au filet moyen de la lame fluide qui rencontre la circonférence extérieure de la roue au point A (*fig.* 28), en menant la ligne AB qui divise en deux parties égales les deux arcs CD et EF, compris entre les parties extérieures des deux aubes consécutives; puis prenant à partir du point A, sur la tangente à la circonférence extérieure de la roue, une distance AG représentant à une échelle quelconque la vitesse de la roue, si par le point G on mène GH parallèle à AB, et que du point A comme centre, avec un rayon AH égal à la vitesse V du filet moyen à son arrivée sur la roue, on décrive un arc de cercle qui coupe GH au point H, la ligne HA prolongée en AI représentera la direction à donner au filet moyen à son arrivée sur la roue. En effet, si on détermine la vitesse relative W en prenant la résultante de la vitesse AH = V et de AK qui est égale et directement opposée à AG = v (page 175), cette résultante sera représentée en grandeur et en direction par AL; ce qu'il fallait obtenir pour que les différents filets composant la veine fluide choquassent le moins possible les deux faces de l'aube pendant tout le temps de leur introduction dans l'auget.

Si l'eau à la même vitesse moyenne dans toute la longueur du coursier d'arrivée, l'épaisseur de la lame y est uniforme, ce que l'on peut généralement supposer dans le cas des roues à augets, et le fond du coursier est parallèle au filet moyen, c'est-à-dire à AI. Comme on a la vitesse de l'eau dans le coursier, ainsi que le débit et la section du coursier, on en conclut la profondeur de la lame fluide et par suite la position du fond du coursier, que l'on place à une distance du filet moyen égale à la demi-épaisseur de la lame. Si le coursier était trop incliné pour que la vitesse de l'eau fût la même sur toute sa longueur, on déterminerait la vitesse à son origine et à son extrémité à l'aide des formules du n° 153; de ces vitesses on conclurait les épaisseurs de la lame fluide, et par suite la position du fond du coursier par rapport à celle du filet moyen.

Dans la construction précédente, on a déterminé la direction à donner au filet moyen en supposant qu'il se mouvait, après avoir quitté le coursier, dans la direction qu'il possédait avant, ce qui n'a pas lieu; car, outre le dénivellement qui existe à l'extrémité du coursier et qui

fait baisser un peu la direction du filet moyen, la pesanteur le fait descendre dès qu'il a quitté l'extrémité du coursier, et lui fait décrire, comme à un corps lancé dans l'espace, une parabole, dont la tangente en un point quelconque représente la direction de la vitesse du filet moyen en ce point (*Int.*, 940 et 1163). Il conviendra donc, dans le cas où le coursier ne versera pas son eau très-près de la roue, soit à cause de l'épaisseur de son fond, soit à cause du jeu laissé entre ce fond et la roue, de prendre pour AI la tangente à cette parabole au point où elle rencontre la circonférence extérieure de la roue.

Fig. 29.



On tracera la courbe décrite par le filet fluide, à partir du point A situé en amont de l'extrémité du coursier, à une distance environ égale à l'épaisseur de la lame fluide (*fig.* 29), en considérant qu'à partir de ce point il est soumis à une vitesse initiale constante V, qui lui a fait parcourir suivant le prolongement de IA, après un temps t, une distance $AB = y = Vt$ (6), et à l'action de la pesanteur, qui lui a communiqué, après le même temps t, une vitesse verticale égale à gt, et lui a fait parcourir un espace vertical $BC = x = 1/2\ gt^2$ (17). En donnant à t différentes valeurs, et déterminant les valeurs correspondantes de y et de x, on a la position du filet moyen après un temps quelconque, ce qui permet de tracer par points la courbe qu'il décrit.

Le filet moyen possède, après le temps t, c'est-à-dire quand il est arrivé au point C, une vitesse $CD = V$ parallèle à AB, et une vitesse verticale $CE = gt$; formant alors le parallélogramme DCEF, la diagonale CF, qui sera tangente à la courbe, représentera en grandeur et en direction la vitesse réelle du filet moyen au point C; d'où l'on voit qu'avec une épure, il est facile de déterminer non-seulement la direction du filet fluide au moment où il choque un point quelconque de l'aube ou de l'eau qui se trouve dans l'auget, mais aussi l'intensité de la vitesse qu'il possède en ce point.

Des valeurs précédentes de y et de x on conclut

$$y^2 = \frac{2V^2}{g} x,$$

ou, en faisant $V^2 = 2gh$,

$$y^2 = 4hx.$$

D'où l'on peut conclure, comme pour un corps lancé dans l'espace sous une direction quelconque, que le filet fluide décrit, en négligeant aussi la résistance de l'air, une parabole dont le paramètre est égal à 4 fois la hauteur h due à la vitesse initiale

Si au lieu de prendre pour axe des y la direction initiale AB on prend l'horizontale AG, on a, en désignant l'angle GAB par α,

$$x' = y' \tang \alpha + \frac{g}{2V^2 \cos^2 \alpha} y'^2,$$

et dans le cas où α serait nul, on aurait

$$x' = \frac{g}{2V^2} y'^2, \quad \text{d'où} \quad y'^2 = \frac{2V^2}{g} x' = 4hx'.$$

Même équation que dans le cas précédent.

Vannage. Il se fait de deux manières, suivant que la roue prend l'eau au-dessus de son sommet, ou à une certaine hauteur au-dessous. Dans le premier cas, si le niveau de l'eau est tout à fait constant, on établit le point supérieur de la roue à $0^m,20$ au-dessous de ce niveau, et à l'aide d'un coursier dont le fond est en fonte, afin de lui donner le moins d'épaisseur possible, on amène l'eau sur la roue. Le fond du coursier se prolonge jusqu'à environ $0^m,40$ en aval du diamètre vertical de la roue, et il convient, pour empêcher l'eau de rejaillir latéralement, de prolonger encore ses parois verticales sur une étendue d'environ trois augets. On incline le fond du coursier d'après les considérations indiquées page 186 (*direction du filet moyen*), en ne le séparant de la roue que de $0^m,01$; par là, l'eau arrive sur la roue avec une faible vitesse, plus grande encore que celle de la roue, et si on ne donne à la couronne que de $0^m,25$ à $0^m,28$ de hauteur suivant le rayon de la roue, ce qui diminue la profondeur de l'auget et par suite la vitesse d'arrivée de l'eau contre le fond de cet auget tout en augmentant la hauteur d'action de l'eau sur la roue, on se trouvera dans les meilleures conditions sous le rapport de l'effet utile rendu par la roue. Lorsque le niveau de l'eau est variable, on établit le seuil de la vanne assez bas pour que pendant les plus basses eaux le débit soit encore suffisant pour la marche de régime de la roue. Le coursier ne doit pas avoir, si cela est possible, plus de 1 mètre ou $1^m,50$ depuis la vanne, avec une inclinaison de 1/12 au plus.

Lorsque le niveau sera inférieur, pendant un certain temps de l'année et d'une certaine quantité, au niveau le plus bas pour lequel la roue peut être établie, il conviendra, malgré la plus grande perte de chute due à l'introduction de l'eau dans les augets, et la plus grande hauteur de déversement de ces augets, hauteur qui croît avec le diamètre de la roue, de faire arriver l'eau à une certaine distance au-dessous du sommet de la roue, du côté d'amont. Dans ce cas, la vanne devra encore être établie pour pouvoir alimenter convenablement la roue pendant les plus basses eaux. Le point supérieur de la roue se place de manière que la vanne ne soit pas trop inclinée, sans cependant prendre un diamètre de roue trop grand ; pour des roues d'un diamètre moyen, il convient de le placer

à $1^m,15$ environ au-dessus du niveau supérieur des plus grandes eaux. Pour les constructions soignées, on emploie, dans ce cas, pour distribuer l'eau sur la roue, le vannage en fonte *fig.* 19 (154), dont la direction du filet moyen de chaque veine fluide partielle se détermine comme il a été indiqué page 186, en prenant pour V la vitesse la plus générale dans chaque orifice. Ordinairement la vanne ne peut que plonger, et les orifices inférieurs ne s'ouvrent qu'après ceux du haut; mais en disposant la vanne de manière qu'on puisse l'élever et l'abaisser à volonté au-dessus et au-dessous des orifices, et en plaçant les orifices supérieurs pour les plus grandes eaux et les orifices inférieurs pour les plus basses, on diminuera considérablement les irrégularités de la vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue.

Dans les constructions moins soignées, tous les orifices du vannage précédent sont remplacés par un seul, dont les parois sont en bois, et qui doit encore produire un débit convenable pendant les plus basses eaux.

Position des roues à augets par rapport au niveau d'aval. Les roues recevant l'eau en dessus tournant en sens contraire du mouvement de l'eau dans le canal de fuite, elles ne doivent jamais être établies au-dessous du niveau supérieur de l'eau dans ce canal. Au contraire, les roues recevant l'eau en dessous du sommet marchant dans le sens de l'eau dans le canal d'aval, elles peuvent sans inconvénient être noyées de la 1/2 hauteur de la couronne, et elles le seront même avec avantage, si elles sont emboîtées d'un coursier circulaire qui empêche le déversement de l'eau. Cette propriété des roues à augets recevant l'eau de côté, de permettre au niveau d'aval de varier dans des limites assez étendues, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré, les rend très-souvent préférables aux roues recevant l'eau en dessus.

Quand les roues sont noyées, il convient de garnir le fond de chaque auget d'une soupape qui s'ouvre quand ce fond arrive dans la position verticale inférieure, de manière à permettre à l'air d'entrer dans l'auget quand l'eau en sort. Quelquefois le fond de chaque auget est garni, suivant qu'il est plus ou moins long, d'un, deux ou trois trous de $0^m,04$ de diamètre; ces trous produisent le même effet que la soupape dont il vient d'être question; mais ils donnent lieu à une perte d'eau.

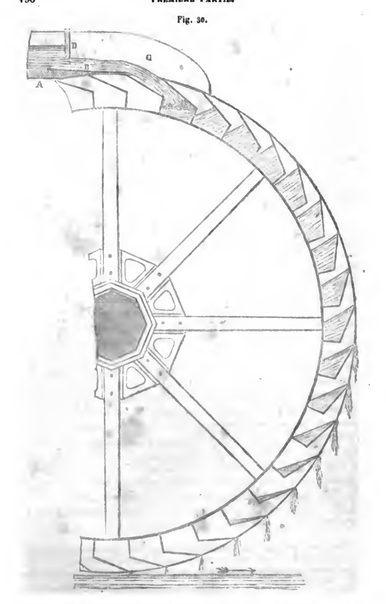
La *fig.* 30 représente à l'échelle de 1/40 la coupe perpendiculaire à l'axe d'une roue à augets recevant l'eau en dessus.

A fond du coursier en bois; il se prolonge jusqu'à une distance convenable en aval de l'axe de la roue par une plaque de fonte B (page 188);

C prolongement des joues latérales du coursier pour empêcher l'eau de jaillir hors de la roue;

D vanne.

Fig. 30.



184. *Roues se mouvant dans un courant à grande section, dites roues pendantes.* L'équilibre dynamique donne, pour une seconde,

$$\mathcal{T}_m = k\frac{1000SV.(V-v)v.}{g}$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur que peut transmettre l'arbre de la roue ;
k coefficient, qui est égal à 0,84 environ d'après les expériences de Bossut, et à 0,80 d'après les observations de M. Poncelet sur les roues des moulins sur bateaux, établis sur le Rhône, à Lyon ;
S section de la partie plongée de la couronne, ou surface de la partie plongée de l'aube placée sur le rayon vertical de la roue, mesurée suivant ce rayon ;
V vitesse à la surface du courant au point où se trouve la roue ; on peut la considérer comme étant la vitesse moyenne de tous les filets qui rencontrent l'aube, à leur arrivée sur cette aube ;
v vitesse du centre de gravité de la partie plongée de l'aube ;
1000SV poids d'eau qui afflue par seconde sur la partie plongée de la couronne ;
$V-v$ vitesse relative d'arrivée de l'eau sur les aubes (*Int.*, 1154).

Pour des valeurs déterminées de S et de V, $\mathcal{T}_m$ sera maximum quand on aura $v=\frac{1}{2}$ V ; (mêmes considérations que n° 179, p. 165). En pratique, on a été conduit à faire $v=0,4$ V, ce qui, théoriquement, diminue $\mathcal{T}_m$ de $\frac{1}{25}$ environ.

Faisant, dans la formule précédente, $k=0,80$, $v=0,4\,V$ et $g=9,8088$, on a sensiblement

$$\mathcal{T}_m = 20SV^3.$$

La longueur des roues varie de 2m,50 à 5 mètres, et leur diamètre extérieur ne dépasse guère 4 ou 5 mètres. La hauteur des aubes doit être de 1/5 à 1/4 du rayon de la roue ; elle ne doit pas être inférieure à 0m,33, et elle est ordinairement comprise entre 0m,50 et 0m,80. L'écartement des aubes, mesuré sur la circonférence extérieure de la roue, est égal à leur hauteur. Le nombre des aubes est ordinairement égal à 12 ; mais on pense qu'il y aurait avantage à le porter à 18 et même à 24. Les aubes doivent être complétement noyées ; mais pas de plus de 0m,05 au-dessus de leur arête intérieure. Cependant, quand la profondeur du courant est considérable, on augmente quelquefois cette hauteur d'immersion ; ainsi pour les moulins du Rhône elle va jusqu'à 0m,30. Des couronnes, ou simplement des rebords de 0m,05 à 0m,10 de saillie sur les extrémités des aubes, produisent un bon effet. Navier conseille d'incliner les aubes sur le rayon, du côté d'amont, sous un angle de 30° quand la roue plonge de 1/4 à 1/5 de son rayon, et de 15° quand elle plonge de 1/3 de son rayon, proportion maximum d'immersion.

185. *Turbine versant l'eau en dessous*, de M. Burdin. Abstraction faite des pertes d'eau et des frottements de l'eau et des pivots, l'effet utile rendu par cette roue serait maximum, si l'eau entrait sans choc dans la roue, et en sortait ne conservant aucune vitesse absolue.

Soit *fig.* 31 :

V la vitesse de l'eau à son arrivée sur la roue, représentée en grandeur et en direction par AV;

v la vitesse de la roue au point A milieu de la longueur des aubes, représentée en grandeur et en direction par Av ;

W la vitesse relative d'arrivée de l'eau contre l'aube; elle est égale à la résultante AW de la vitesse V, et de la vitesse AB qui est égale à v prise en sens contraire (*Int.*, 1154), et sa direction est celle que l'on doit donner à l'élément supérieur de l'aube ;

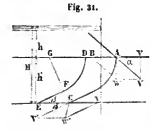
V' la vitesse relative de l'eau au point C, bas de l'aube, par rapport à cette aube; elle est représentée en grandeur et en direction par CV', qui est dirigé suivant le dernier élément de l'aube;

W' la vitesse absolue que conserve l'eau à la sortie de l'aube ; elle est égale à la résultante CW' de la vitesse V' et de la vitesse v;

α l'angle que fait la direction AV du filet moyen avec l'horizontale;

β l'angle que fait la direction du dernier élément de l'aube avec l'horizontale.

Fig. 31.



On a (*Int.*, 1014)

$$W^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha.$$

Pour qu'il n'y ait pas choc à l'entrée de l'eau dans la roue, l'élément supérieur de l'aube doit être dirigé suivant la direction de la vitesse relative W, et pour le cas où cette vitesse est verticale, direction qu'il convient en pratique de donner à l'élément supérieur de l'aube, on a

$$v = V\cos\alpha, \quad \text{et} \quad W^2 = V^2 - v^2 = V^2(1 - \cos^2\alpha).$$

Pour que l'eau ne conserve pas de vitesse absolue à sa sortie de la roue, il faut que l'on ait

$$W'^2 = V'^2 + v^2 - 2V'v\cos\beta = 0.$$

Ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'on a $\beta = 0$, c'est-à-dire $\cos\beta = 1$ et $V' = v$: il faudrait donc diriger horizontalement l'élément inférieur de l'aube.

Si ces conditions d'entrée et de sortie de l'eau pouvaient être rigoureusement remplies en pratique pour tous les filets fluides, l'effet utile rendu par la roue serait égal à l'effet dépensé, et on aurait

$$\mathcal{T}_m = P(h + h') = PH.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur transmis par l'arbre de la roue ;

P poids d'eau dépensé ;

h hauteur du niveau de l'eau d'amont, au-dessus de la surface supérieure de la roue ;

h' hauteur verticale de la roue ; il paraît suffisant de faire h' égal à $0^m,20$ ou $0^m,25$;

$H = h + h'$ chute totale ; la roue ne doit pas être noyée.

En négligeant les frottements de l'eau contre la roue, on a

$$V'^2 = W^2 + 2gh'.$$

Faisant dans cette formule

$$V' = v = V\cos\alpha, \quad \text{et} \quad W^2 = V^2(1 - \cos^2\alpha),$$

elle devient, en remplaçant V^2 par $2gh$,

$$2gh\cos^2\alpha = 2g(h + h') - 2gh\cos^2\alpha;$$

d'où l'on tire

$$\cos^2\alpha = \frac{H}{2h}.$$

On a $v = V\cos\alpha$, et par suite $\cos^2\alpha = \frac{v^2}{V^2} = \frac{v^2}{2gh}$;

donc

$$\frac{v^2}{2gh} = \frac{H}{2h}, \quad \text{d'où} \quad v^2 = gH.$$

Désignant par U la vitesse due à la hauteur H, on a

$$^2 = 2gH = 2v^2;$$

d'où l'on tire

$$v = \frac{U}{\sqrt{2}} = 0{,}707U.$$

La vitesse de la roue, correspondant au maximum d'effet, doit donc être les 0,707 de la vitesse due à la hauteur de chute totale. En pratique, par analogie avec les turbines Fourneyron, on peut conclure que la vitesse de rotation doit être moyennement les 0,665 de U.

Nous avons vu plus haut que, théoriquement, l'effet utile maximum était

$$\mathcal{T}_m = PH;$$

Mais en pratique il y a toujours, à cause de l'épaisseur de la veine fluide, choc de l'eau contre les aubes, quelle que soit du reste la forme de ces aubes. De plus, il faut éviter de faire la partie inférieure de l'aube horizontale; car l'eau, en la quittant, serait frappée par l'aube suivante, d'où il résulterait une perte de travail considérable : ainsi la vitesse absolue de l'eau n'est jamais nulle au sortir de la roue. Il y a donc perte de travail par le choc de l'eau et par la vitesse qu'elle conserve, et on a toujours $\mathcal{T}_m < PH$.

Une turbine de ce genre, construite à Saint-Étienne, par M. Burdin, a donné $\mathcal{T}_m$ compris entre les 0,68 et les 0,70 de PH. La valeur de h', c'est-à-dire la hauteur verticale des aubes, était $0^m,40$.

L'aube est engendrée par une droite qui se meut en restant horizontale, et en s'appuyant sur l'axe de la roue et sur une courbe continue DE, *fig.* 31, tracée sur un cylindre vertical dont le rayon est le rayon moyen de la roue. Cette courbe est verticale au point supérieur D, et tangente à la partie inférieure à une droite EF faisant avec l'horizontale un angle de 20 à 25°. Pour tracer cette courbe, par le point E on mène une droite EF faisant avec l'horizontale un angle de 20 à 25°; on prolonge cette droite jusqu'à son point de contact avec la circonférence décrite du point inférieur C de l'aube précédente, comme centre, avec un rayon CF égal à la plus courte distance des deux aubes successives; on prolonge le rayon CF, passant par le point de contact, jusqu'au point G où il rencontre la surface supérieure de la roue; du point G comme centre, avec un rayon égal à GF, on décrit l'arc de cercle FD, et la ligne DFE est la directrice de l'aube.

La distance des aubes, mesurée sur la circonférence moyenne de la roue, paraît devoir être comprise entre $0^m,11$ et $0^m,15$, et celle des directrices du distributeur, entre $0^m,16$ et $0^m,17$. Ces directrices sont dirigées suivant AV à leur partie inférieure.

Il paraît convenable de faire le rayon intérieur R' de la roue égal aux 0,65 ou 0,70 du rayon extérieur R. Le rayon moyen $r = \frac{R + R'}{2}$.

Le volume d'eau à dépenser doit pouvoir passer librement par les orifices laissés entre les aubes. Comme, d'après le mode de génération des aubes indiqué plus haut, la plus courte distance de deux aubes consécutives est sensiblement $d \sin \beta$ (*Int.*, 841), d étant la distance de ces aubes mesurée sur la circonférence moyenne, si l est la différence des deux rayons de la roue, l'ouverture laissée entre deux aubes consécutives est à peu près $ld \sin \beta$, et on a

$$Q = kl n d \sin \beta V''.$$

Q volume d'eau dépensé par seconde;
k coefficient de la dépense, lequel, d'après les observations de M. Morin sur les orifices évasés des turbines de M. Fourneyron, est compris entre 0,80 et 0,86;
n nombre d'aubes;
V'' vitesse de l'eau dans la plus petite section de l'orifice laissé entre deux aubes consécutives, V''=V'.

L'espace occupé par les aubes et les assemblages étant à peu près le 1/25 de la surface de la roue, on a

$$nd = 2\pi r - 0,04 \times 2\pi r = 0,96 \times 2\pi r,$$

et par suite, en supposant que l'eau arrive à plein orifice à la partie supérieure de la roue,

$$Q = kl \times 1,92\pi r \sin \beta V''.$$

On a

$$r = \frac{R + R'}{2} = \frac{R + 0,68R}{2} = \frac{1,68R}{2} = 0,84R\ ;$$

d'où l'on tire

$$R = \frac{r}{0,84} = 1,19\,r,$$

et on conclut

$$R' = 0,68 \times 1,19r = 0,81r,$$

et

$$l = 0,58r.$$

Il faut non-seulement que les orifices de la roue puissent dépenser l'eau fournie par le cours d'eau, mais aussi que les orifices distributeurs puissent l'introduire dans la roue. En négligeant le jeu laissé entre le dessus de la roue et le bas de ces distributeurs, la vitesse dans ces orifices est celle V due à h, et en procédant comme pour la partie inférieure de la roue ; on a

$$Q = kl'V\ (2\pi r - a)\ \sin.$$

a espace horizontal occupé par les vannes distributrices et par leurs siéges, ou leurs pivots si elles sont à charnière ;

l' dimension des orifices distributeurs suivant le rayon ; c'est aussi celles des orifices formés par les aubes, à leur partie supérieure.

186. *Turbine versant l'eau latéralement*, de M. Fourneyron. Ces turbines fonctionnent quand elle ne sont pas noyées (*fig.* 34) ; mais pour qu'elles utilisent toute la chute disponible, elles doivent, comme cela a lieu ordinairement, l'être complétement. Elles ont l'avantage de fonctionner quand elles sont noyées dans l'eau à une profondeur quelconque, et elles conviennent à toutes les chutes.

L'eau s'y meut horizontalement, d'où il résulte que la pesanteur ne modifie en rien ni le travail ni la vitesse de l'eau pendant que celle-ci est dans la roue ; ce qui n'a pas lieu pour les turbines versant l'eau en dessous. L'effet de la force centrifuge est nul quand l'eau se meut verticalement ; mais il n'en est pas ainsi dans ce cas, où l'eau se meut horizontalement.

Comme pour les turbines versant l'eau en dessous, abstraction faite des pertes d'eau et des frottements de l'eau et des pivots, l'effet utile serait maximum, si l'eau entrait sans choc dans la roue, et en sortait ne conservant aucune vitesse absolue.

Soit, *fig.* 32 :

V la vitesse avec laquelle l'eau arrive au point A, représentée en grandeur et en direction par la ligne AV, qui est dirigée suivant la tangente à la directrice EA ;

v la vitesse de la roue au point A origine de l'aube, représentée en grandeur et en direction par Av, qui est tangente à la circonférence intérieure de la roue au point A ;

W la vitesse relative d'arrivée de l'eau sur le point A de l'aube ; elle est représentée en grandeur et en direction par la résultante AW des deux vitesses V et v, cette dernière étant prise de A en B, c'est-à-dire en sens contraire du mouvement de la roue (*Int.*, 1154). La direction AW est celle que l'on doit donner au premier élément de l'aube ;

V' la vitesse relative de l'eau au point C extrémité de l'aube, par rapport à cette aube ; elle est représentée en grandeur et en direction par la droite CV' dirigée suivant le dernier élément de l'aube ;

v' la vitesse de la roue au point C extrémité de l'aube ; elle est représentée en grandeur et en direction par la droite Cv' tangente à la circonférence extérieure de la roue ;

W' la vitesse absolue de l'eau à sa sortie de la roue ; elle est représentée en grandeur et en direction par la résultante CW' des deux vitesses V' et v' ;

α l'angle que font entre elles les directions des deux vitesses V et v ;

β l'angle que fait la direction de la vitesse V' avec la tangente à la circonférence extérieure de la roue au point C ;

H la chute totale ou la différence de niveau de l'eau en amont et en aval de la roue ;

$U=\sqrt{2gH}$ la vitesse due à la chute H ;

P le poids d'eau dépensé par seconde en kilogrammes ;

Q le volume d'eau dépensé par seconde en mètres cubes ;

r le rayon intérieur de la roue ;

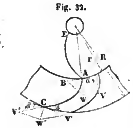
R le rayon extérieur de la roue ;

l la hauteur de la roue, ou mieux la dimension verticale des orifices laissés entre les aubes ;

a la distance de deux aubes successives, mesurée sur la circonférence intérieure de la roue ;

a' la distance de deux aubes successives, mesurée sur la circonférence extérieure de la roue.

Fig. 32.



On a (*Int.*, 1014)

$$W^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha. \qquad (a)$$

Pour le cas où la vitesse W est dirigée suivant le rayon de la roue, direction qu'en pratique il convient de donner au premier élément de l'aube, on a $v = V\cos\alpha$, et par suite $W^2 = V^2 - v^2$.

Pour que la vitesse absolue W' soit nulle, on doit avoir (*Int.*, 1014)

$$W'^2 = V'^2 + v'^2 - 2V'v'\cos\beta = 0. \qquad (b)$$

Ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'on a $\beta = 0$, c'est-à-dire $\cos\beta = 1$ et $V' = v'$. Cela conduirait à faire l'aube tangente à la circonférence extérieure; mais, outre qu'en pratique la vitesse W' ne peut être nulle, puisqu'elle doit satisfaire au débit, il convient de ne pas

faire l'aube tangente à la circonférence extérieure de la roue; car cette aube tendrait à projeter l'eau sur l'aube suivante, ce qui produirait des réactions considérables.

M. Belanger, en supposant la levée de la vanne égale à la hauteur des aubes, d'où il résulte que l'eau remplit complétement les canaux formés par ces aubes, et en négligeant les frottements et les actions mutuelles de l'eau, les frottements des pivots, et l'influence du jeu laissé entre le vannage et la roue; mais en tenant compte de la force centrifuge, a posé la formule

$$V^2 + v^2 - W^2 = 2gH = U^2. \qquad (c)$$

De laquelle on tire, en remplaçant W^2 par sa valeur (a),

$$Vv \cos \alpha = gH = \frac{U^2}{2}; \qquad (d)$$

d'où on conclut, pour le cas où $v = V \cos \alpha$,

$$v^2 = gH = \frac{U^2}{2}, \quad \text{et} \quad v = \frac{U}{\sqrt{2}} = 0{,}707U. \qquad (e)$$

Comme on a

$$v : v' :: r : R, \quad \text{d'où} \quad v = v' \frac{r}{R} \quad \text{et} \quad v' = v \frac{R}{r}, \qquad (f)$$

on a donc

$$v' = 0{,}707U \frac{R}{r}.$$

Remarquant que la largeur de l'orifice par lequel l'eau arrive dans le canal laissé entre deux aubes, mesurée normalement à la direction de la vitesse V, est sensiblement $a \sin \alpha$, et que la largeur de ce canal à l'orifice de sortie, mesurée normalement à la direction de la vitesse V', est sensiblement $a' \sin \beta$ (*Int.*, 841), comme la quantité d'eau qui entre dans le canal est égale à celle qui en sort, on a

$$Vla \sin \alpha = V'la' \sin \beta,$$

ou, en remarquant que les arcs a et a' sont entre eux comme les rayons r et R,

$$Vr \sin \alpha = V'R \sin \beta, \quad \text{d'où} \quad V = V' \frac{R}{r} \times \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}.$$

Et comme, pour le maximum d'effet, on peut supposer, eu égard à la petitesse de l'angle β, $V' = v'$, on a

$$V = v' \frac{R}{r} \times \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}. \qquad (g)$$

Remplaçant, dans la formule (*d*), v par sa valeur (*f*), et V par sa valeur (*g*), on en conclut

$$v'^2 = gH \frac{\tang}{\sin\beta}. \qquad (A)$$

Comme (formule *e*) $v^2 = gH$, on a donc

$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{\tang \alpha}{\sin\beta}. \qquad (B)$$

La formule (*g*) donne, en élevant au carré et en remplaçant v'^2 et $\frac{R^2}{r^2}$ par leurs valeurs (A) et (B),

$$V^2 = gH \frac{1}{\cos^2\alpha}.$$

Ce qui fait voir que l'on aura $V^2 = 2gH$, c'est-à-dire que la vitesse due à H ne sera pas modifiée à l'entrée de l'eau dans la roue, ce qui est convenable sous le rapport de l'effet utile, lorsqu'on aura $\cos^2\alpha = \frac{1}{2}$, c'est-à-dire $\alpha = 45°$.

Remplaçant, dans la formule (*b*), V'^2 et v'^2 par leur valeur commune (A), on conclut

$$W'^2 = 2gH \frac{\tang\alpha\,(1 - \cos\beta)}{\sin\beta}. \qquad (h)$$

La perte de travail due à la vitesse que conserve l'eau est alors

$$\frac{P}{2g} W'^2 = PH \frac{\tang\alpha\,(1 - \cos\beta)}{\sin\beta},$$

et l'effet utile rendu par la roue,

$$\mathcal{T}_m = PH \left(1 - \frac{\tang\alpha\,(1 - \cos\beta)}{\sin\beta}\right). \qquad (C)$$

Nous avons vu plus haut que la section de chaque canal formé entre deux aubes successives était, à l'orifice de sortie, $la' \sin\beta$; la somme de toutes les sections de sortie sera alors, en supposant que la tôle des aubes occupe les 0,04 de la circonférence extérieure,

$$0{,}96 \times 2\pi R l \sin\beta.$$

Comme, d'après M. Fourneyron, cette somme doit être égale au 1/4 de la surface du cercle intérieur de la roue, on a donc

$$\frac{1}{4}\pi r^2 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{4}\pi R^2 \frac{\sin\beta}{\tang\alpha} = 0{,}96 \times 2\pi R l \sin\beta;$$

d'où on tire

$$l = 0{,}15\ R\ \frac{1}{\tang\alpha} \qquad (D)$$

Comme on a

$$Q = 0{,}96 \times 2\pi R l \sin\beta \times k V',$$

on en conclut, en faisant le coefficient de la dépense $k = 0{,}80$, et en remplaçant l par sa valeur (D),

$$R = \sqrt{\frac{Q \tang\alpha}{0{,}628\,V'\sin\beta}}. \qquad (E)$$

Quand $\alpha = 45°$, on a $\tang\alpha = 1$, et les formules (A), (B), (h), (C), (D) et (E) deviennent respectivement (A'), (B'), (h'), (C'), (D') et (E') :

$$v'^2 = gH \frac{1}{\sin\beta}, \qquad (A')$$

$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin\beta}, \qquad (B')$$

$$W'^2 = 2gH \frac{(1-\cos\beta)}{\sin\beta}, \qquad (h')$$

$$T_m = PH\left(1 - \frac{(1-\cos\beta)}{\sin\beta}\right), \qquad (C')$$

$$l = 0{,}15\ R, \qquad (D')$$

$$R = \sqrt{\frac{Q}{0{,}628\,V'\sin\beta}}. \qquad (E')$$

Application. Il s'agit d'appliquer une turbine à un cours d'eau dont le débit est $1^{m.\ cub.},50$ par seconde, et la chute 4 mètres.

Supposant $\alpha = 40°30'$ et $\beta = 25°$, on a $\tang\alpha = 0{,}8541$, $\sin\alpha = 0{,}6494$, $\sin\beta = 0{,}4226$, $\cos\beta = 0{,}9063$, $U = \sqrt{2gH} = 8^m,86$. Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans les formules (A), (E), (B), (D), (C), on a successivement :

$$v' = V' = \sqrt{9{,}8088 \times 4\,\frac{0{,}8541}{0{,}4226}} = 8^m,9, \qquad (A)$$

$$R = \sqrt{\frac{1{,}50 \times 0{,}8541}{0{,}628 \times 8{,}9 \times 0{,}4226}} = 0^m,737, \qquad (E)$$

$$r = R\sqrt{\frac{0{,}4226}{0{,}8541}} = 0{,}703\,R = 0^m,518, \qquad (B)$$

$$l = \frac{0{,}15 \times 0{,}757}{0{,}8541} = 0^m,112, \qquad (D)$$

$$\mathcal{T}_m = \text{PH}\left(1 - \frac{0,8541\,(1-0,9063)}{0,4226}\right) = \text{PH}\,(1-0,19) =$$

$$0,81\ \text{PH} = \frac{0,81 \times 1500 \times 4}{75} = 64,8 \text{ chevaux-vapeur.} \quad \text{(C)}$$

N étant le nombre de tours de la turbine par minute, on a

$$N = \frac{v' \times 60}{2\pi R} = \frac{8,9 \times 60}{2 \times 3,14 \times 0,737} = 115,33.$$

Il convient de vérifier si les orifices distributeurs peuvent débiter $1^{\text{m.cu.}},50$ par seconde. La formule (g) donne

$$V = 8,9\,\frac{0,737}{0,518} \times \frac{0,4226}{0,6494} = 8^{\text{m}},24;$$

et comme la somme des orifices d'entrée de l'eau dans la roue est, en supposant que les aubes, normales à la circonférence intérieure de la roue, interceptent encore environ les 0,04 de cette circonférence,

$$0,96 \times 2\pi r l \sin \alpha,$$

la dépense par ces orifices est, pour une seconde,

$$0,96 \times 2\pi r l \sin\alpha \times kV = 0,96 \times 2 \times 3,14 \times 0,518 \times 0,112 \times 0,6494 \times 0,80 \times 8,24$$
$$= 1^{\text{m.cu.}},497, \text{ sensiblement } 1^{\text{m.cu.}},500.$$

Résultats pratiques. La formule (C) de l'application donne l'effet utile $\mathcal{T}_m = 0,81\text{PH}$; mais des expériences faites en 1838 par M. Morin ont donné au maximum $\mathcal{T}_m = 0,69\text{PH}$ pour une turbine, et $\mathcal{T}_m = 0,79\text{PH}$ pour une autre; encore n'obtient-on d'ordinaire que $\mathcal{T}_m = 0,65\text{PH}$ ou $\mathcal{T}_m = 0,70\text{PH}$ quand la levée de la vanne est à peu près égale à la hauteur des aubes.

Le rapport de l'effet utile d'une turbine à l'effet total dépensé diminue à mesure que la vanne s'abaisse au-dessous du point supérieur des aubes; c'est ce que confirme le tableau suivant des résultats obtenus par M. Morin, sur une turbine de deux mètres de diamètre.

LEVÉE de la vanne.	HAUTEUR de chute.	DÉPENSE par seconde.	NOMBRE de tours par minute.	RAPPORT de $\mathcal{T}_m$ à PH.
m.	m.	m. cub.		
0.27	3.30	2.44	61.50	0.793
0.20	3.34	1.87	58.00	0.700
0.15	3.04	1.57	58.25	0 696
0.09	3.21	1.07	61.60	0.392
0.05	3.58	0.62	60.00	0.238

M. Fourneyron a cherché à diminuer l'inconvénient des faibles levées de vanne, en séparant la hauteur totale de la roue par des cloisons horizontales en tôle.

L'application précédente donne

$$\frac{v'}{U}=\frac{8,90}{8,86}=1,0045, \text{ c'est-à-dire } v'=1,0045\sqrt{2gH}.$$

Dans l'une des expériences de M. Morin, la valeur de v' correspondant au maximum d'effet a été $0,81\sqrt{2gH}$, et dans l'autre, $0,80\sqrt{2gH}$.

On a

$$v=v'.\frac{r}{R}=\frac{0,518}{0,737}1,0045\sqrt{2gH}=0,707\sqrt{2gH},$$

ce que nous a déjà donné la formule (e). En pratique, la valeur de v correspondant au maximum d'effet varie de $0,65\sqrt{2gH}$ à $0,69\sqrt{2gH}$: ainsi l'on peut dire que la pratique confirme la théorie. La petitesse de la valeur pratique de la vitesse extérieure v' de la roue, par rapport à sa valeur théorique, est due à ce que le rapport $\frac{r}{R}$ est plus grand que ne l'indique la théorie ; ainsi il atteint quelquefois 0,83, au lieu que l'application faite plus haut donne 0,703 ; il est ordinairement compris entre 0,70 et 0,80. M. Fourneyron emploie la valeur 0,70 quand le rayon intérieur de la roue est petit.

L'effet utile maximum n'est pas sensiblement altéré quand la valeur de v qui lui correspond augmente ou diminue d'un sixième à un cinquième.

D'après M. Morin, pour des chutes moyennes, la vitesse de l'eau dans le cylindre-vanne ne doit pas excéder le quart ou le cinquième de la vitesse due à la chute totale. De cette condition, on conclura le diamètre de la vanne, et en l'augmentant de $0^m,04$ ou $0^m,05$ pour l'épaisseur du cylindre et le jeu de la roue, on aura le diamètre intérieur de la roue. Du rapport qui doit exister entre les diamètres de la roue, indiqué ci-dessus, on conclura le diamètre extérieur.

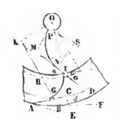
L'écartement des aubes, suivant la circonférence intérieure de la roue, se prend à peu près égal à la hauteur l de ces aubes.

L'angle β, que font les aubes avec la circonférence extérieure de la roue, peut varier de 20° à 25°.

L'angle α, que font les directrices qui amènent l'eau sur les aubes avec la circonférence intérieure de la roue, varie de 36° à 45°.

Le nombre des courbes directrices est moitié de celui des aubes quand ce dernier, qui est toujours pair, varie de 18 à 24, et le 1/3 quand le nombre des aubes dépasse 24. Outre ces courbes directrices, on en

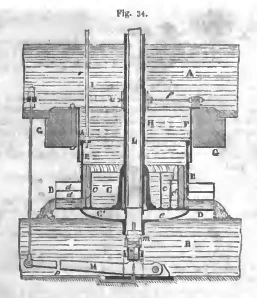
place quelquefois d'autres qui ne s'étendent que de la circonférence intérieure de la roue jusqu'à moitié du rayon de cette circonférence.



Pour tracer les aubes, on divise la circonférence extérieure de la roue en autant de parties égales qu'il y a d'aubes, fig. 33; des points de division A, B..., avec un rayon égal à a' sin β, on décrit des arcs de cercle; aux points A. B... on mène les droites AC, BD... faisant avec les tangentes AE, BF... des angles égaux à l'angle β; on mène le rayon BG perpendiculaire à BD, et du point H, pris sur BG prolongé, on décrit l'arc de cercle GI tangent à l'arc de rayon BG, et normal à la circonférence intérieure de la roue au point I. Le point H se détermine en menant par les différents points de GH des tangentes à la circonférence intérieure de la roue, et celui de ces points qui donne HI = HG est le centre de l'arc GI. Raccordant ensuite l'arc IG avec l'arc de rayon BG et la droite AC, on obtient la courbe IGA, qui est la section horizontale de l'aube. On trace de même toutes les aubes; mais on facilite cette opération en remarquant que toutes les droites analogues à BH sont tangentes à une même circonférence décrite du centre O de la roue, avec un rayon égal à la perpendiculaire OK abaissée sur le prolongement de BH, et en remarquant aussi que toutes les droites analogues à AC et BD sont tangentes à la circonférence décrite avec la perpendiculaire OD pour rayon. Tous les points analogues à H se trouvent sur une même circonférence dont le centre est celui de la roue.

Pour tracer les courbes directrices, on mène, fig. 33, la droite IM faisant l'angle α avec la tangente IH à la circonférence intérieure de la roue; on mène ensuite la droite OM faisant l'angle IOM = OIM; on prend IN égal au rayon extérieur OP du tube qui enveloppe l'arbre de la roue; on élève les perpendiculaires PS, NS, et de leur point de rencontre S, avec le rayon SP = SN, on décrit l'arc de cercle PN, qui forme, avec la partie droite NI, la coupe horizontale de la directrice.

Fig. 34.



La figure 34 représente, à l'échelle de 1/40, la coupe par l'axe d'une des quatre turbines-Fourneyron construites au moulin à l'anglaise de Saint-Maur, près Paris, et commandant chacune dix paires de meules.

A bief supérieur;

B canal de fuite;

C espace dans lequel se trouvent les courbes directrices;

c douze courbes directrices partant du moyeu et ayant 0m,36 de hauteur;

c' douze courbes directrices partant du milieu de l'espace annulaire C, et ayant 0m,30 de hauteur;

C' plateau fixe portant les directrices c, c'; il porte un moyeu très-élevé qui s'assemble sur le tuyau en fonte H;

i bague en fer tournée; elle est formée de deux morceaux, et sert à fixer le plateau C' sur le tuyau H; en soulevant le plateau, on enlève la bague, et on descend le plateau;

D roue proprement dite, contenant trente aubes de 0m,27 de hauteur;

e disque servant de bras à la roue. Il est percé de quatre trous qui permettent de retirer les objets qui peuvent pénétrer dans les compartiments; son moyeu se fixe sur l'arbre à l'aide d'une bague en fer semblable à celle i;

dd cloisons horizontales en tôle divisant la hauteur de la roue; le disque qui termine supérieurement la roue est également en tôle;

E vanne; c'est un cylindre en fonte, dont le diamètre extérieur est exactement égal au diamètre intérieur de la roue;

o coins en bois vissés contre le cylindre E. Leur forme est celle des canaux compris entre les directrices, qu'ils ferment quand on baisse la vanne. On a soin de les arrondir supérieurement et inférieurement, afin de diminuer la contraction des veines fluides, qui est d'autant plus grande que la vanne est plus rapprochée du plateau C'. Leur longueur, mesurée horizontalement et suivant la direction des canaux dans lesquels ils glissent, est de 0m,25 environ;

h garniture formée d'un cuir recourbé, empêchant l'eau de s'échapper entre le cylindre E et le tuyau de retenue en fonte F;

I trois tiges servant à manœuvrer la vanne; elles pénètrent chacune dans le moyeu à écrou d'un pignon; une roue d'engrenage folle sur l'arbre L permet de faire tourner simultanément les trois pignons, et par suite de manœuvrer la vanne;

G charpente à laquelle est fixée le système;

H cylindre en fonte enveloppant l'arbre de la turbine, et auquel est fixé le plateau C' qui porte les directrices; il s'élève jusqu'au-dessus du niveau de l'eau, où il se fixe soit à une charpente, soit à une pièce de fonte;

f trois fortes tiges reliant un manchon en fonte qui entoure le cylindre H à la charpente G. Des vis *u* servent à centrer le tuyau H et à le fixer au manchon. Cette précaution est nécessaire lorsque, comme dans ce cas, la hauteur est grande;

u vis fixant le cylindre H et le maintenant dans la position verticale;

L arbre moteur en fonte;

n pointe en acier fixée par deux petites clefs dans une crapaudine en cuivre, dans laquelle arrive un filet d'huile; sur la tête de cette pointe tourne un grain d'acier dont est garni le bas de l'arbre L; ce grain est représenté coupé dans la figure. La pointe *n* est garnie de saignées latérales qui amènent l'huile sur toute la surface frottante;

m bague fixée au bas de l'arbre; elle sert à retenir l'huile et à maintenir l'arbre sur le pivot *n*. Par cette disposition, les matières solides seraient obligées de s'élever pour venir entre les surfaces frottantes;

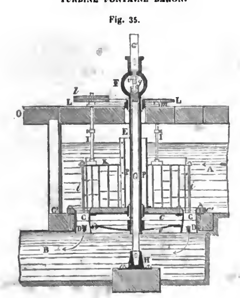
v chaise sur laquelle repose la crapaudine; deux petites clefs y fixent celle-ci, de manière à l'empêcher de tourner tout en lui permettant de se soulever;

M fort levier, de $2^m,57$ d'une articulation à l'autre, servant à maintenir le système mobile à une hauteur convenable;

p tube communiquant au-dessus du sol de l'usine, et amenant l'huile dans la crapaudine.

187. *Turbine* de M. Fontaine-Baron. Cette turbine est du genre de celle de M. Burdin (185); elle verse l'eau en dessous. La figure 35 en représente une à l'échelle de 1/60, de la force de 18 chevaux, construite à l'établissement de Vadenay, près Châlons-sur-Marne. La chute moyenne est de $1^m,40$ et la dépense de 1400 litres par seconde. Cette roue fait marcher quatre à cinq paires de meules.

Fig. 35.



A bief supérieur ;
B canal de fuite ;
C couronne en fonte portant trente-deux cloisons ou directrices qui forment autant de canaux amenant l'eau contre les aubes de la roue. La couronne et les directrices sont venues d'une seule pièce de fonte ;
D couronne en fonte de 0m,235 de hauteur, formant la roue proprement dite ; elle porte soixante-quatre aubes venues de fonte avec les deux cylindres qui la composent ;
e disque servant de bras à la roue ; il est creusé en forme de vasque, et, afin de pouvoir le nettoyer au besoin et serrer les écrous et les vis de pression qui fixent son moyeu sur le cylindre E, on l'a percé de trous vers le milieu de son rayon ;
E cylindre en fonte servant d'arbre moteur ; des vis de serrage fixent le moyeu du disque *e* à ce cylindre, sur lequel le moyeu entre à frottement ;
F renflement du cylindre E ;
G arbre fixe en fer de 0m,07 de diamètre ;
H sabot en fonte dans lequel est fixé l'arbre G, et qui est solidement fixé sur une forte pierre de taille ;
G' arbre proprement dit de la roue ; il est solidement claveté dans le haut du cylindre E ;
g pivot en fer forgé acéré par le bas, par lequel la roue, son arbre G' et le cylindre E reposent sur le support G, qui porte à son sommet une crapaudine en bronze à grain d'acier. L'idée de faire ainsi reposer tout le poids de la partie mobile sur un pivot supérieur, ce qui rend le graissage facile, est due à M. Arson ;
v écrou fixant le pivot *g* au système mobile, et réglant la hauteur de celui-ci ;
i tiges des petites vannes en fonte et bois qui ferment chacune un des canaux qui amènent l'eau sur la roue ;
K couronne en fonte sur laquelle sont fixées les trente-deux tiges *i* ;

I trois tiges fixées à la couronne K; elles sont filetées à leur partie supérieure, et elles portent chacune une douille, qui, en venant heurter contre le plancher O, limite la course de la tige et par suite celle des vannes;

LL roues en fonte autour desquelles passe une chaîne sans fin qui les fait tourner simultanément; les moyeux de ces roues sont taraudés et reçoivent le haut des tiges I, de sorte que ces tiges montent ou descendent suivant que l'on tourne dans un sens ou dans l'autre;

l roue d'engrenage fixée sur une des roues L; elle est manœuvrée par un pignon dont l'arbre porte une roue conique qui s'engrène avec un pignon monté sur l'arbre d'une manivelle;

m croisillons en fonte réglant l'écartement des tiges I; ils sont réunis par un moyeu qui porte un coussinet en bronze dans lequel tourne le cylindre E;

c disque servant de bras à la couronne C; son moyeu porte un coussinet en bronze qui guide le cylindre E à sa partie inférieure;

c' plateau en bois de chêne formant l'ouverture des canaux directeurs;

C' cadre en bois sur lequel sont boulonnés la couronne fixe C et le plateau *c'*; il est scellé dans les murs de fondation, et placé à la hauteur du niveau inférieur ordinaire de l'eau;

P cylindre en fonte formé de deux parties boulonnées, fixé sur le plateau *c'*, et empêchant le contact de l'eau avec le cylindre tournant E;

O plancher de l'usine.

La figure 36 représente à l'échelle de 1/15 le tracé des aubes, des directrices et des petites vannes.

Fig. 36.

L'aube est formée de deux arcs de cercle : l'un, *ab*, a son centre situé sur le plan qui limite supérieurement la turbine, de sorte que cet arc est normal à ce plan; l'autre, *bc*, a son centre situé au-dessus de ce plan, à une distance telle, que *bc* étant tangent à *ab* au point *b*, il fasse avec le plan inférieur de la roue un angle qui ne dépasse pas 19 à 20°.

La directrice *ad* se termine inférieurement par un arc de cercle formant avec le plan supérieur de la roue un angle qui ne dépasse pas 11 ou 12°. Supérieurement on donne à la directrice la forme qui permet le mieux l'introduction de l'eau.

Chaque vanne est formée par une plaque de fonte *e*, qui glisse contre le haut d'une directrice et dans deux rainures venues dans les couronnes, et qui vient se reposer sur la partie inférieure de la directrice consécutive quand la vanne est abaissée. Derrière la plaque *e* se trouve fixée une garniture en bois, que l'on taille de manière à favoriser l'introduction de l'eau.

Les turbines de M. Fontaine-Baron rendent un effet utile égal aux 0,68 ou 0,70 du travail absolu du moteur, quand les vannes laissent entièrement ouverts les canaux directeurs.

Quand les vannes baissent de manière à réduire la dépense dans le rapport de 4 à 3 environ, l'effet utile est encore les 0,575 du travail absolu du moteur à la vitesse du maximum d'effet.

La vitesse à la circonférence moyenne de la roue, correspondant au maximum d'effet, est les 0,548 de la vitesse due à la hauteur de chute (131), et elle peut varier de son 1/4 en plus ou en moins sans que l'effet soit sensiblement diminué.

Turbine double. M. Fontaine-Baron construit encore une turbine double pour les cas où le volume d'eau varie dans des limites considérables. Elle est formée de deux séries bien distinctes d'aubes séparées par une couronne intermédiaire. Toutes les aubes et les trois couronnes sont fondues d'une seule pièce comme pour la turbine simple.

Il y a également deux séries de directrices fondues, comme les aubes, d'une seule pièce avec trois couronnes. Chacune des deux parties de la roue a un vannage semblable à celui d'une roue simple, et indépendant de celui de l'autre partie; de sorte que l'on peut à volonté ne faire arriver l'eau que sur l'un ou l'autre compartiment, ou sur les deux à la fois, suivant le volume d'eau à débiter.

188. *Turbine-Jonval*, perfectionnée par MM. A. Kœchlin et compagnie. Cette turbine est encore du système de celle de M. Burdin (185). Elle est placée à la partie supérieure d'un cylindre en fonte rétréci et alésé au point où elle se trouve, de manière à l'envelopper exactement en ne laissant qu'un millimètre de jeu au plus. La partie contenant la couronne qui porte les directrices s'évase légèrement. A la partie inférieure et au-dessous du niveau d'aval, dont la variation est indifférente, le cylindre vertical s'adapte sur un tuyau rectangulaire horizontal muni d'une vanne qui permet de suspendre à volonté l'arrivée de l'eau. Cette vanne est la seule disposée pour faire varier la dépense de petites quantités.

La roue est ordinairement placée à une hauteur intermédiaire entre les niveaux d'amont et d'aval, de sorte que la pression de l'eau sur les aubes est due en partie à l'aspiration. Cette disposition permet de diminuer la longueur de l'arbre de la roue.

Lorsque la variation de la dépense d'eau est variable et durable, on fixe à la couronne de la roue des coins obturateurs qui rétrécissent les canaux formés par les aubes. Pour une longueur d'aubes de $0^m,1154$, mesurée suivant le rayon, les obturateurs d'une turbine fermaient $0^m,0674$. L'on peut donc faire varier dans des limites très-éloignées le débit de cette roue.

On a reconnu, par des expériences faites au Bouchet, par M. Morin, que l'effet utile que rend cette roue est les 0,72 du travail absolu du moteur quand tous les orifices sont complétement ouverts, qu'il est environ les 0,70 ou 0,71 quand la moitié seulement des aubes sont

garnies de leurs obturateurs, et encore les 0,63 quand toutes les aubes sont garnies de leurs obturateurs.

La vitesse à l'extérieur de la roue, correspondant au maximum d'effet, paraît devoir être les 0,70 de la vitesse $\sqrt{2gH}$ due à la chute totale H, et pouvoir varier de 1/4 en plus ou en moins sans que le rendement soit sensiblement diminué.

Les constructeurs admettent les proportions suivantes :

18 pour le nombre des aubes ;
1/16 du diamètre extérieur D pour la plus courte distance de deux aubes consécutives ;
1/3 D pour la longueur des aubes ou des canaux qu'elles forment, mesurée suivant le rayon.

Connaissant la dépense Q ou le diamètre D, on calcule l'autre de ces quantités par la relation suivante, dans laquelle H est la chute totale :

$$D = \sqrt{\frac{128Q}{9\sqrt{2gH}}}$$

Les courbes directrices sont à peu près verticales à leur partie supérieure, et elles font un angle d'environ 34° avec l'horizon à leur partie inférieure. Les aubes sont à peu près inclinées à 70° à l'horizon à leur partie supérieure, et à 30° à leur partie inférieure.

Proportions de la turbine expérimentée au Bouchet :

Diamètre extérieur		$0^{m},810$
Largeur des augets	sans obturateur	$0\ ,120$
	avec obturateur	$0^{m},048$
Nombre des augets		18
Sections ou orifices de la roue, ensemble		$0^{m.c.},0706$
Aire de l'orifice de la vanne de sortie		$0^{m.c.},2977$
La chute disponible a varié de		$1^{m},76$ à $1^{m},40$

189. Dans ces derniers temps, plusieurs ingénieurs se sont occupés de l'établissement des turbines, et quelques-uns sont arrivés à des dispositions qui ont donné de bons résultats.

La turbine de M. Krafft est de ce nombre; elle verse l'eau en-dessous comme celle Fontaine-Baron, dont elle diffère naturellement plus dans les détails que dans l'ensemble. M. Krafft a aussi établi des turbines doubles pour obvier à de grandes variations de dépenses d'eau. Des clapets qui peuvent se rabattre sur toute la surface annulaire formée par les arêtes supérieures des directrices permettent de supprimer à volonté le passage de l'eau par un plus ou moins grand nombre des canaux formés par les directrices, et par suite de modifier la puissance de la roue.

Des expériences faites sur une turbine Krafft établie à Chevroz, dans le Doubs, ont donné un rendement de plus de 75 pour cent à des vitesses très-variables.

M. Charles Lombard a aussi donné une disposition des turbines versant l'eau en dessous. Des petites vannes partielles permettent de supprimer le passage de l'eau par le nombre voulu des canaux formés par les directrices.

MM. L. D. Girard et Ch. Callon viennent d'apporter aux turbines versant l'eau en dessous, ou mieux aux turbines Fontaine-Baron, un perfectionnement qui ne manque ni d'originalité ni d'importance, et qui a fait donner au système la qualification d'*hydropneumatique*.

Ces ingénieurs, en foulant de l'air sous la turbine, y maintiennent l'eau au niveau de la surface inférieure mobile, quoique dans le canal de fuite l'eau s'élève à un niveau suffisant pour noyer la roue.

De cette disposition, il résulte plusieurs avantages, dont le principal est que l'on peut n'ouvrir qu'un très-petit nombre des vannes partielles, et par suite réduire considérablement le débit de la roue, sans que le rapport de l'effet utile au travail total soit considérablement diminué. On conçoit que si la roue tournait dans l'eau, ce rapport diminuerait considérablement, puisque les résistances dues au mouvement de la roue restent à peu près les mêmes quel que soit le débit de la roue.

Des expériences faites par MM. Girard et Callon sur une turbine hydropneumatique établie à la papeterie d'Égreville ont montré que, selon que le nombre des vannettes ouvertes a varié de 10 à 30 sur le nombre total 40, l'effet de l'hydropneumatisation a varié de 25 à 9 pour 100.

D'autres expériences faites sur une turbine hydropneumatique établie dans une papeterie de Troyes ont montré que le nombre des vannettes ouvertes ayant varié de 10 à 32 sur le nombre total 38, et la puissance de 9,33 à 22,08 chevaux, l'effet utile a été de 0,77 sans variation bien sensible.

Ces résultats permettent donc de ne pas trop diminuer le diamètre des turbines, et par suite d'obtenir une vitesse de rotation non exagérée. C'est même pour atteindre ce but que MM. Girard et Callon ont étudié une turbine dans laquelle il n'y aurait que quelques vannettes placées dans un tuyau de chute amenant l'eau sur une partie seulement du contour de la roue.

La turbine de MM. Girard et Callon contenant autant de courbes directrices que d'aubes, la section normale des tuyaux *adducteurs* est moindre que les orifices récepteurs, d'où il résulte une libre déviation des veines liquides, ce qui est du meilleur effet dans une turbine hydropneumatique. De plus, les corps charriés s'arrêtent entre les directrices, d'où on les retire plus facilement que s'ils étaient descendus entre les aubes.

MACHINES A ÉLEVER L'EAU.

190. *Machines à colonne d'eau.* Ces machines, employées en plusieurs endroits pour les épuisements des mines, peuvent être à double effet; mais elles sont ordinairement à simple effet, c'est-à-dire que la colonne d'eau n'agit que sur une des faces du piston. Elles communiquent le mouvement à des pompes, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un balancier, dont les bras sont inégaux, afin de diminuer la course des pistons des pompes.

L'effet utile rendu par ces machines, c'est-à-dire le produit du poids d'eau élevé par la hauteur d'élévation, peut être exprimé par

$$k\text{PH}.$$

P poids d'eau dépensé;
H hauteur de chute;
PH effet total dépensé;
k coefficient, qui provient du frottement de l'eau dans les tuyaux et le corps de pompe, et de celui des pistons et autres organes de la machine; des changements de direction et de vitesse de l'eau; de la vitesse que conserve l'eau motrice en sortant du tuyau d'évacuation et de celle que conserve l'eau élevée en sortant du tuyau ascensionnel, etc.

Les anciennes machines, dites de Hœll, employées aux épuisements des mines de Hongrie, out donné les résultats du tableau suivant, que nous extrayons du *Traité des machines* de Hachette ;

HAUTEUR des sources.	DIAMÈTRES des pistons	EAU dépensée en 24 heures.	HAUTEUR d'élévation de l'eau.	EAU élevée en 24 heures.	RAPPORT de l'effet utile à l'effet dépensé.
m.	m.	m. cub.	m	m. cub.	
85.757	0.352	1900.328	89.656	817.036	0.45
89.656	0.325	2467 965	214.290	479.879	0.46
79.910	*Id.*	685.550	46.777	394.285	0.33
79.910	*Id.*	582.711	28.585	589.566	0.36
89.056	*Id.*	2467.965	66.267	1336.815	0.40

Le diamètre du tuyau de chute de la première machine de ce tableau est de $0^m,162$. La course du piston est de $1^m,95$, et il s'élève et s'abaisse environ sept fois par minute.

Dans les machines établies plus récemment dans les mines de Hongrie, du Hartz, etc., l'effet utile est plus considérable que ne l'indique le tableau précédent, et il paraîtrait que des machines établies à Freyberg, en Saxe, ont donné un effet utile égal à 0,70 PH, et même 0,75 PH quand les pompes mues par les machines travaillaient avec toute l'eau qu'elles pouvaient contenir.

On est porté à supposer que les deux énormes machines construites à Huelgoat, par M. Juncker, produiront ce dernier effet utile quand elles fonctionneront sous la charge que l'on doit atteindre. Quand la quantité d'eau à élever n'était que de 29,9 litres par seconde pour les deux machines, et la hauteur d'élévation 179 mètres, l'effet utile n'était que de 0,45 PH. Les dimensions ont été déterminées pour élever 30 litres d'eau, par seconde et par machine, à une hauteur de 230 mètres; conditions dans lesquelles se trouveront les machines quand les travaux souterrains seront arrivés à la profondeur qu'ils doivent atteindre.

La chute motrice étant de 60 mètres, on présume que la dépense d'eau sera de 160 à 175 litres par seconde pour élever les 30 litres à 230 mètres, d'où il résulterait un effet utile de 0,72 à 0,66PH. M. Juncker compte sur une dépense de 178 litres d'eau et un effet utile de 0,65 PH.

Ces deux machines, établies à 110 mètres environ au-dessous de la surface du sol, élèveront l'eau d'un seul jet à 230 mètres de hauteur, sans aucun intermédiaire, ni levier, ni engrenage (page 219). Le piston soupape qui permet à l'eau d'arriver sur le piston moteur est disposé de manière qu'au commencement et à la fin de la course de ce dernier, l'eau n'arrive qu'avec une très-faible vitesse, ce qui évite tout changement de direction brusque et toute secousse; aussi ces énormes machines exécutent-elles leurs grands mouvements sans le moindre bruit.

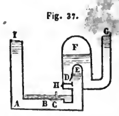
Les cylindres de ces machines sont en fonte et ouverts par le haut; ils ont $1^m,03$ de diamètre et $2^m,75$ de hauteur. Le piston est en bronze, avec une simple garniture en cuir; sa course est de $2^m,30$, et il en exécute jusqu'à 5,5 par minute. La tige de pompe est fixée directement au piston moteur; elle traverse le fond du cylindre, et elle descend jusqu'au fond du puits, où elle s'adapte directement au piston de la pompe. Afin de faire en partie équilibre au poids de 16000 kilogr. environ de la tige de pompe, on a imaginé de placer le cylindre moteur à 14 mètres au-dessous de la galerie d'écoulement des eaux; ce qui oblige d'élever l'eau, après son action sous le piston moteur, à 14 mètres de hauteur; c'est la tige qui, en descendant, produit ce travail. Cette disposition porte à 74 mètres la hauteur du tuyau de chute, qui pouvait n'[illegible] que de 60 mètres, hauteur de chute motrice. Les tuyaux de chute et d'évacuation ont $0^m,38$ de diamètre, le corps de pompe a $0^m,455$, et la colonne d'ascension $0^m,275$.

191. *Bélier hydraulique.* Cette machine, fig. 37, imaginée par Montgolfier en 1797, se compose des parties suivantes :

AB *corps de bélier;* il établit la communication entre le réservoir alimentaire, ou le tuyau de chute AI, et la partie opérante de la machine;
C *soupape d'arrêt*, plus dense que l'eau;
D *clapet d'ascension*, qui est respectivement fermé ou ouvert, quand la soupape C est ouverte ou fermée;
la partie qui porte la soupape C et le clapet D s'appelle *tête du bélier;*

E *matelas d'air* destiné à diminuer les fortes secousses de l'eau contre la tête du bélier;
F *réservoir d'air* destiné à rendre régulière l'ascension de l'eau;
G *tuyau d'ascension;*
H *clapet aspirateur* s'ouvrant du dehors au dedans, et destiné à fournir, à chaque coup de bélier, une certaine quantité d'air au matelas E et au réservoir F, qui, sans cette précaution, en seraient promptement privés.

Fig. 37.



La soupape C étant abaissée, l'eau tend à s'écouler par l'orifice ouvert avec une vitesse due à la hauteur de l'eau dans le réservoir alimentaire; mais cette soupape étant d'un poids convenable, elle est entraînée par le courant, et elle vient s'appliquer sur son siége, de manière à fermer passage à l'eau, qui, en vertu de sa vitesse acquise, réagit contre les parois de l'appareil, ouvre le clapet D, pénètre dans le réservoir F, et de là dans le tuyau d'ascension, où elle s'élève à un niveau supérieur à celui du réservoir alimentaire. Bientôt la vitesse que possédait l'eau est détruite, le clapet D se referme, la soupape C s'abaisse, et une nouvelle période recommence sans interruption. Dès que l'eau a réagi sur la tête du bélier après la fermeture de la soupape C, en vertu de l'élasticité du matelas E et des parois de l'appareil, il se produit un retour d'eau vers la source, qui diminue la pression au point de permettre au clapet H de s'ouvrir et de laisser entrer une certaine quantité d'air dans l'appareil.

Quelquefois la soupape C et le clapet D sont remplacés par des boulets creux dont le poids est double de celui de l'eau qu'ils déplacent. Dans ce cas, afin de ne pas gêner la circulation de l'eau dans l'appareil, on place le boulet d'arrêt sur le prolongement de AB, au delà de la position du boulet d'ascension. On a soin de garnir de cuir ou de toile goudronnée les orifices que ces boulets doivent fermer.

Un bélier construit par M. Montgolfier fils, à Mello, auprès de Clermont-sur-Oise, est muni de 7 boulets ou soupapes d'arrêt de $0^m,04$ de diamètre, dont les siéges sont sur une même platine en fonte; le boulet ou clapet d'ascension a aussi $0^m,04$ de diamètre. Le corps de bélier est en fonte et pèse 1450 kilogrammes; la tête du bélier seule pèse 200 kilogrammes. L'épaisseur des tuyaux est de $0^m,014$. La capacité du réservoir à air n'est que de 6 litres. Ce bélier bat 60 coups à la minute. (Consulter le tableau suivant.)

Jusqu'à présent, la théorie n'a pu donner une expression satisfaisante de l'équilibre dynamique de cette machine, dans laquelle il se passe des réactions qu'on ne peut analyser. La pratique même n'a donné que des résultats trop discordants pour permettre d'établir une formule générale, d'une exactitude suffisante, établissant les relations qui doivent exister entre les dimensions des différentes parties du bé-

lier, ainsi que le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé. Cependant, d'après les résultats d'expériences faites par Eytelwein sur deux béliers de différentes grandeurs, M. d'Aubuisson a conclu la formule pratique

$$ph = 1.20P\left(H - 0.2\sqrt{Hh}\right).$$

p poids d'eau élevé ;
h hauteur d'élévation ;
P poids d'eau dépensé ;
H hauteur de chute.

Dans ses expériences, Eytelwein a reconnu :

1° Qu'une grande longueur de corps de bélier était avantageuse à l'effet ; que jamais cette longueur ne devait être moindre que les 3/4 de la hauteur à laquelle on élève l'eau, et que son diamètre est convenablement donné par l'expression $1.7\sqrt{Q}$, Q étant le volume d'eau dépensé par seconde;
2° Que le diamètre du tuyau d'ascension pouvait être moitié de celui du corps de bélier ;
3° Que le réservoir à air était indispensable, et que sa capacité, qui ne paraissait pas avoir une grande influence sur l'effet, était égale à celle du tuyau d'ascension ;
4° Que les deux soupapes devaient être très-rapprochées l'une de l'autre, et que celle d'arrêt pouvait être indifféremment placée en amont ou en aval du réservoir à air ;
5° Qu'il était essentiel que l'ouverture de la soupape d'arrêt ne fût pas moindre que la section du corps de bélier, mais qu'elle pouvait lui être égale ou un peu supérieure ;
6° Que l'effet serait diminué par le poids du battant s'il excédait une certaine limite.

Quand le plus grand des béliers soumis à l'expérience par Eytelwein a été reconnu disposé de la manière la plus avantageuse, le corps du bélier avait 13^{m},33 de longueur et 0^{m},0567 de diamètre, et l'aire de la soupape d'arrêt était de 0^{mq},0024. La disposition du bélier était celle indiquée fig. 37.

Des expériences d'Eytelwein, il résulte que le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé est d'autant plus grand que la hauteur d'élévation est plus petite par rapport à celle de chute; ainsi pour une chute de 3^{m},066, et une hauteur d'élévation de 8^{m},017, ce rapport a été de 0,90, valeur plus considérable que pour toute autre machine ; au lieu que la chute étant de 0^{m},601, et la hauteur d'élévation de 11^{m},78, ce rapport n'a plus été que de 0,181.

TABLEAU des proportions de différents béliers, et du rapport de l'effet utile à l'effet dépensé (*).

CORPS DE BÉLIER.		HAUTEUR		DIAMÈTRE de la colonne d'ascension.	EAU dépensée en 1'.	EAU élevée en 1'.	RAPPORT de l'effet utile à l'effet dépensé.
diamètre.	longueur.	de chute.	d'élévat.				
m.	m.	m.	m.	m.	litres.	litres.	
»	»	2 60	16.06	»	62.00	6.24	0.570
0.108	33.00	11.37	59.44	»	140.00	17.50	0.653
0.054	32.50	10.60	34.10	»	84.00	17.00	0.651
0.203	8.00	0.979	4.55	»	1987.00	269.00	0.629
0.027	33.00	7.00	60.00	0.14	12.42	0.97	0.670

192. *Pompes* (fig. 58). Les pompes sont dites à *simple effet*, lorsqu'elles n'élèvent l'eau que pendant la montée ou pendant la descente du piston, et à *double effet*, lorsque l'eau est élevée pendant la montée et pendant la descente du piston.

Lorsque le piston s'élève au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard, on dit que la pompe est *aspirante*,

Une *pompe élévatoire* est celle qui élève l'eau pendant la montée du piston, et une *pompe foulante* est celle qui l'élève pendant la descente du piston. Une pompe à double effet est à la fois *foulante et élévatoire*.

Une pompe peut être *aspirante et élévatoire*, ou *aspirante et foulante*, ou encore *aspirante*, *foulante et élévatoire*; l'un de ces cas se réalise toutes les fois que le piston s'élève à un niveau supérieur à celui de l'eau dans le puisard, ce qui a lieu généralement.

Le *piston* n'est quelquefois qu'un simple morceau de bois de charme, qu'il convient de faire bouillir dans l'huile; mais pour les pompes de quelque importance il est en fonte ou en bronze. La garniture est en cuir, et elle forme sur les faces du piston un godet à contour flexible que l'eau comprimée applique contre les parois du corps de pompe, ce qui donne une garniture *autoclave*.

Souvent, comme dans la fig. 38, le piston est un cylindre métallique plein ou creux, d'une longueur un peu supérieure à sa course, et d'un

(*) Le premier des béliers de ce tableau est celui que Montgolfier avait établi dans son habitation à Paris;

Le deuxième est celui de Mello, cité plus haut;

Le troisième a été établi à Lyon par M. Fay-Sathonay, ancien maire de Lyon; la longueur du tuyau d'ascension est de 227 mètres;

Le quatrième est construit à la blanchisserie de M. Turquet, près de Senlis;

Le cinquième se trouve près de Clermont-Oise, dans la sous-préfecture de M. Larochefoucault; la longueur du tuyau d'ascension est de 420 mètres.

diamètre de 0m,01 à 0m,02 plus petit que celui du corps de pompe. Ce piston, appelé *plunger* par les Anglais, plonge dans le corps de pompe et prend la place de l'eau qui s'y trouve en l'obligeant de s'élever dans le tuyau d'ascension; en se retirant, il laisse un vide qui produit l'aspiration. La garniture de ce piston est fixe et sert de *stuffenbox*.

Une pompe à simple effet exige l'emploi de deux soupapes : l'une, dite *soupape d'aspiration*, placée sur le tuyau d'aspiration, le plus près possible du point inférieur de la course du piston ; l'autre, appelée *soupape de retenue*, placée sur le tuyau d'ascension. L'une de ces soupapes peut être placée sur le piston, qui est alors percé d'un orifice convenable pour le passage de l'eau ; la soupape fixe prend le nom de *soupape dormante*. Une pompe à double effet est garnie de quatre soupapes dormantes; le piston n'en porte pas.

Afin de pouvoir vérifier facilement l'état des soupapes et en rendre rapides les réparations, il convient de renfler les tuyaux aux points où elles se trouvent; ces renflements, que l'on nomme *chapelles*, portent une grande ouverture que l'on ferme par une plaque de fonte boulonnée.

La figure 38 représente à l'échelle de 1/20 la coupe par l'axe d'une pompe à piston plongeur.

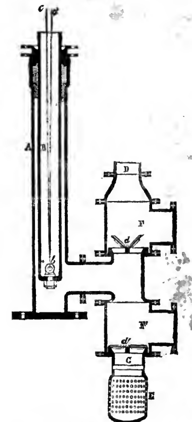


Fig. 38.

A	corps de pompe;
B	piston au fond duquel est boulonnée une oreille à laquelle s'articule la tige de la pompe. En fixant la tige au bas du piston, on diminue son obliquité, et par suite le frottement du piston dans son stuffenbox;
be, *bc'*	lignes représentant les positions de l'axe de la tige dans ses plus grands écarts;
a	étoupes du stuffenbox;
o	coussinet en bronze retenant les étoupes;
FF'	chapelles;
D	tuyau d'ascension;
C	tuyau d'aspiration;
E	*lanterne*;
d	soupape de retenue;
d'	soupape d'aspiration.

Si le piston faisait un vide parfait, l'eau s'élèverait dans la colonne d'aspiration à une hauteur de 10^m,3 environ au-dessus du niveau du puisard, hauteur faisant équilibre à la pression atmosphérique au point où se trouve la pompe; mais en pratique, quand le piston est au bas de sa course, la pression de l'air qui occupe l'espace compris entre le piston et la soupape d'aspiration étant, en négligeant le poids de la soupape, égale à la pression atmosphérique, quand le piston est en haut de sa course, la pression de cet air devient

$$h\frac{q}{Q+q};$$

h	pression atmosphérique;
q	*espace nuisible* ou volume de l'air lorsque le piston est au bas de sa course;
Q	volume engendré par le piston dans une levée;
$Q+q$	volume occupé par l'air lorsque le piston est au haut de sa course.

Pour qu'après un plus ou moins grand nombre de coups de piston la pompe puisse s'amorcer, c'est-à-dire pour que l'eau puisse entrer dans le corps de pompe, il faut donc que l'on ait au maximum, en dé-

signant par x la hauteur de la soupape d'aspiration au-dessus du puisard, et en négligeant le poids de cette soupape,

$$x = h - h\,\frac{q}{Q+q} = h\left(1 - \frac{q}{Q+q}\right).$$

Il ne faut pas seulement que l'eau puisse pénétrer dans la partie inférieure du corps de pompe; mais aussi qu'elle puisse atteindre le point le plus élevé de la course du piston, lequel, en négligeant le poids des soupapes et la force élastique de l'air et de la vapeur que dégage l'eau soumise à une faible pression, peut se trouver à une hauteur $h = 10^{m},3$ environ au-dessus du niveau du puisard. En pratique, il est rare que l'eau puisse s'élever à 9 mètres de hauteur; il convient de considérer 8 mètres à $8^{m},50$ comme hauteur moyenne d'élévation maxima. La hauteur de la colonne d'aspiration ne se prend guère que de 5, 6 ou 7 mètres.

La vitesse avec laquelle l'eau peut entrer dans le corps de pompe, orsque le piston occupe un point quelconque de sa course, est, en négligeant le poids des soupapes, leur frottement et celui de l'eau contre le tuyau d'aspiration.

$$v = \sqrt{2g(h - h')}. \qquad (a)$$

- v vitesse de l'eau dans la soupape d'aspiration ;
- h pression atmosphérique, exprimée en eau que l'on élève;
- h' hauteur du point où se trouve le piston au-dessus du niveau du puisard. Cela suppose que l'eau ne dégage ni air ni vapeur, et qu'elle atteint le piston ; s'il n'en était pas ainsi, h' serait égale à la hauteur du niveau de l'eau dans le corps de pompe, au-dessus du puisard, augmentée de la pression de l'air et de la vapeur qui séparent l'eau du piston.

Pour que le piston fonctionne sans choc, il suffit que l'eau arrive en même temps que lui au point supérieur de sa course. Supposant la vitesse du piston uniforme, il suffira donc que l'on ait

$$ksv = \mathrm{SV}, \text{ d'où } s = \frac{\mathrm{SV}}{kv}.$$

- k coefficient de la dépense (137);
- s section de la soupape d'aspiration ;
- v vitesse de l'eau dans cette soupape, quand son niveau arrive au point supérieur de la course du piston; v a alors sa plus petite valeur (a);
- S section du piston;
- V vitesse du piston.

Si le piston est mû par une manivelle ou par un excentrique, sa vitesse n'est pas uniforme; dans ce cas, pour s'assurer que le corps de pompe sera plein quand le piston arrivera au haut de sa course, on déterminera d'abord par tâtonnement le point où l'eau peut commencer à ne plus suivre le piston; pour ce point on aura

$$ksv = SV,$$

v et V ayant les valeurs qui correspondent à ce point, v se détermine par la formule (a), et V est donnée, d'une manière approchée, à l'aide d'une épure représentant le mouvement du piston par rapport à celui du bouton de la manivelle. Pendant que la manivelle termine le reste de sa course, il faut que le volume d'eau qui s'introduit dans le corps de pompe soit égal au volume engendré par le piston pour arriver à la fin de sa course.

Ce volume est (n° 156, formule (e))

$$Q' = Tks\sqrt{2g}\left(\sqrt{h_1} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4S}\right).$$

Q' volume d'eau qui s'introduit dans le corps de pompe pendant le reste de la marche du piston ;
T temps que met le piston à terminer sa course ;
h_1 différence de charge sur les deux faces de la soupape d'aspiration, au commencement du temps T ; elle est égale à h diminuée de la hauteur du point où l'eau commence à ne plus suivre le piston, au-dessus du puisard.

Au n° 156, la section s de la soupape représente la section de l'orifice d'écoulement, et la section S du corps de pompe, la section A du bassin qui se remplit.

Pour que le piston ne choque pas l'eau quand il change de direction, on doit donc avoir, au minimum,

$$Q' = LS.$$

L espace qu'il reste à parcourir au piston pour terminer sa course.

En pratique, il convient non-seulement d'atteindre cette limite pour Q', mais aussi que l'eau accompagne le piston pendant toute sa course. On devra donc prendre s pour le cas où les valeurs, correspondantes entre elles, de V et de v exigent la valeur maxima de s.

Les diamètres des tuyaux d'aspiration et d'ascension sont ordinairement compris entre la 1/2 et les 2/3 de celui du corps de pompe; il ne convient pas de les prendre de moins de la moitié, et quelquefois ils sont égaux à celui du piston.

Pour une pompe quelconque, l'équilibre dynamique donne, en négligeant toutes les résistances passives (48) :

$$\mathcal{T}_m = PH.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur transmis à la tige du piston ;
P poids d'eau élevé ;
H hauteur à laquelle on élève l'eau au-dessus du puisard ;
PH effet utile produit.

En pratique, l'effet utile est diminué par le frottement de la garni-

ture du piston contre les parois du corps de pompe, par celui de la tige du piston dans le stuffenbox, et par celui de l'eau contre les parois des tuyaux et du corps de pompe; il est diminué aussi par le poids et le frottement des soupapes, par les variations de direction et de vitesse que subit l'eau dans son parcours, et par la vitesse que conserve l'eau à sa sortie du tuyau d'ascension. Avec des pompes bien proportionnées on peut obtenir PH = de 0,75 à 0,85 $\mathcal{T}_m$; mais il convient de ne compter que sur 0,75 $\mathcal{T}_m$ et même moins.

Langsdorf donne pour l'expression du frottement de la garniture du piston

$$n\mathrm{DH}'.$$

D diamètre du piston en mètres;
H' pression de l'eau sur le piston, exprimée en mètres de hauteur d'eau;
n coefficient égal à 7 pour les corps de pompe en laiton bien poli, à 15 pour ceux en fonte simplement forés, à 25 pour ceux en bois assez lisses, et à 50 pour ceux en bois dégradés par l'usage.

Comme on le voit, l'auteur de cette formule admet que le frottement est indépendant de la hauteur de la garniture (64). Ce frottement étant exprimé en kilogrammes, le travail qu'il absorbe en une seconde est

$$n\mathrm{DH'V} \text{ kilogrammètres.}$$

Pour des pompes bien construites et en très-bon état d'entretien, le volume d'eau élevé est égal à celui engendré par le piston diminué de 0,03 à 0,04; mais pour les pompes ordinaires ce déchet va à 0,1 et même à 0,2. Des pompes, au lieu d'élever un volume d'eau moindre que celui engendré par le piston, ont donné un débit plus grand; cela tient à ce que l'eau en mouvement continue encore sa marche après l'arrivée du piston à la fin de sa course; ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que la vitesse est grande, circonstance qu'il faut éviter.

Pour les épuisements des mines, on a quelquefois à élever l'eau à des hauteurs considérables. Une seule pompe peut le faire d'un seul jet, comme à Huelgoat (190); mais les clapets durent très-peu, et il convient qu'une même pompe n'élève l'eau qu'à une hauteur de 30 à 60 mètres; pour des hauteurs plus considérables, on doit employer plusieurs pompes étagées sur la hauteur du puits.

Pour les pompes mues à bras d'homme, la course du piston est de 0m,30 environ; pour celles mues par des machines, elle est ordinairement de 1 mètre à 1m,20, quelquefois elle va à 2 mètres, et à Huelgoat elle est de 2m,30.

La vitesse du piston d'une pompe marchant régulièrement atteint rarement 0m,30; à Huelgoat, elle est cependant de 0m,42; mais il convient qu'elle soit comprise entre les limites 0m,16 et 0m,24.

Pour l'épuisement des mines de plomb du Bleyberg, on a établi deux

machines, système Cornouailles, d'une puissance qui dépasse tout ce qui avait été fait, même en Angleterre.

Le piston à vapeur de chaque machine a 2m,67 de diamètre et une course de 3m,66.

Les pistons des pompes ont le même diamètre que ceux à vapeur, mais seulement 2m,86 de course. Avec ces dimensions on a dû employer les soupapes à double siége ou à lanternes.

Les machines peuvent donner facilement 7 levées par minute; elles sont à haute pression, à détente et à condensation. En supprimant la détente, chaque machine pourrait donner une puissance de 700 à 800 chevaux.

Dans des expériences faites avec soin, la profondeur d'épuisement n'étant actuellement que de 71m,50, et la détente ayant lieu aux 0,19 de la course, l'effet utile moyen a été de 234 chevaux, et la consommation de combustible, de 1k,45 par cheval utile et par heure. Le volume d'eau élevé a été un peu supérieur à celui engendré par les pistons.

Pour les pompes à incendie, les pistons ont ordinairement 0m,12 de course, et ils ne s'élèvent, dans les mouvements les plus rapides, que 60 fois par minute, ce qui correspond à 0m,24 de vitesse. Les pistons, qui sont en bronze, ont environ 0m,60 de longueur et 0m,12 de diamètre. Le récipient d'air, que l'on place entre les deux corps de pompe, a ordinairement 0m,35 de hauteur sur 0m,25 de diamètre; il est destiné à rendre constant le jet d'eau. Le long ajutage ou *lance* qu'on dirige vers le feu à éteindre a environ 0m,016 de diamètre à l'orifice. Avec les proportions et la vitesse précédentes, huit pompiers obtiennent un jet de 26 mètres de hauteur.

Pour les grandes pompes, afin de rendre, autant que possible, le mouvement de l'eau constant dans la colonne d'ascension et même dans celle d'aspiration, quand elle est longue, il convient de munir chacune d'elles d'un récipient d'air placé à leur partie inférieure; ces récipients ont encore l'avantage de rendre moins violent les chocs des soupapes.

Quand les eaux tiennent en suspension des corps étrangers, on garnit le bas du tube plongeur d'une caisse percée de petits trous, appelée *lanterne;* l'eau arrive dans la colonne d'aspiration en passant par ces petits trous où elle subit, en quelque sorte, une filtration.

193. *Presse hydraulique.* Quoique cette machine ne soit pas employée à élever l'eau, sa manière de fonctionner lui fait naturellement prendre place à côté des pompes. La pression théorique que peut transmettre le plateau fixé au grand piston d'une presse hydraulique est

$$Q = \frac{PLD^2}{ld^2}.$$

Q pression transmise;

P force motrice; un homme agissant sur un levier sans faire usage du poids de son corps donne moyennement $P = 25$ kilog., et même $P = 50$ kilog., si le travail n'est que d'un instant;

L bras de levier de la puissance P, ou distance du point d'application de cette force à l'axe de rotation de son levier;

D diamètre du grand piston;

d diamètre du petit piston;

l bras de levier de la résistance qu'oppose le piston au mouvement du levier de la puissance P; cette résistance est égale à la pression de l'eau sur le petit piston, ou encore à $P\frac{l}{L}$.

Supposant $P = 25$ kilog., $L = 1^m,00$, $D = 0^m,20$, $l = 0^m,03$ et $d = 0^m,03$, on a

$$Q = \frac{25 \times 1 \times 0.04}{0.03 \times 0.0009} = 37\,037 \text{ kil.}$$

Les diverses résistances passives de la machine, et surtout le frottement du piston contre sa garniture, font que la pression réelle Q' que l'on peut obtenir en pratique n'est que les 0,80 de Q pour des efforts modérés; elle atteint les 0,85 de Q pour de grands efforts.

Le rapport de la vitesse du grand piston à celle du petit est égal au rapport inverse des sections ou des carrés des diamètres de ces pistons; pour l'exemple précédent, ce rapport est donc $\frac{d^2}{D^2} = \frac{0.0009}{0,04} = \frac{9}{400}$.

Les pistons sont pleins, et ils se meuvent dans un stuffenbox ordinaire dont les étoupes sont remplacées par des rondelles de cuir; la garniture du grand piston a $0^m,04$ de hauteur, et il convient, afin de la rendre bien étanche, de la disposer de manière que non-seulement la pression du stuffenbox l'applique, en l'élargissant, contre le piston et le renflement du corps de pompe, mais aussi qu'elle fasse fermeture autoclave.

On se rendrait compte du frottement de la garniture des pistons à l'aide, soit de la formule du n° 64, dans laquelle f varierait de 1/5 à 1/6, soit de celle de Langsdorf (page 219).

194. *Chapelet incliné*. Cette machine se compose d'une série de palettes rectangulaires fixées à une chaîne sans fin, et se mouvant de bas en haut dans une auge inclinée en bois. Cette auge plonge dans le puisard et s'élève jusqu'à la hauteur à laquelle il convient de monter l'eau.

Le jeu laissé entre les bords latéraux des palettes et les parois de l'auge est de $0^m,006$ environ. Pour une même section de palette, le développement de la partie de son contour en contact avec l'auge est minimum, ainsi que la quantité d'eau qu'elle laisse échapper, quand sa hauteur est moitié de sa longueur; cependant, en pratique, la hauteur est quelquefois les 4/5 de la longueur. L'écartement des

palettes varie de 1 fois à 1 fois 1/2 leur hauteur, et leur vitesse, de 1 mètre à $1^m,50$ par seconde.

Un homme exerçant sur une manivelle un effort de 8 kilog. avec une vitesse de $0^m,75$ par seconde peut produire, en 8 heures, un effet utile moyen équivalent à 80 ou 90 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur; mais on ne doit compter en général que sur un effet utile égal aux 0,40 du travail dépensé; ce faible rendement fait que cette machine n'est plus employée.

195. *Chapelet vertical.* Cette machine ne diffère de la précédente qu'en ce que l'auge inclinée est remplacée par un tuyau vertical, appelé *buse*, à section carrée ou cylindrique. Les palettes ont la même forme, et de $0^m,13$ à $0^m,16$ de côté ou de diamètre; leur jeu dans la buse est moins grand que pour les chapelets inclinés, et, afin de diminuer encore les pertes d'eau, on rend ce jeu le plus petit possible en plaçant au bas de la buse un tuyau métallique bien dressé, de la section des palettes et d'une longueur excédant un peu la distance de deux palettes consécutives. Souvent les palettes sont formées d'une rondelle en cuir gras serrée entre deux plaques de tôle; cette rondelle fait garniture, et rend les pertes d'eau aussi petites que possible.

Le chapelet vertical convient surtout pour les épuisements où il faut élever l'eau à plus de 4 mètres de hauteur. La longueur de la buse est en général comprise entre 4 et 6 mètres.

On emploie de 4 à 8 hommes appliqués à des manivelles de $0^m,40$ de rayon, et faisant de 20 à 30 tours par minute, pour manœuvrer un chapelet. Ces hommes travaillant 8 heures par jour, et par relais de deux heures, produisent chacun un effet utile journalier équivalant à 110 ou 120 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre. En général on peut compter que l'effet utile moyen est égal aux 0,65 de l'effet dépensé, et que la quantité d'eau élevée est les 5/6 de l'eau d'abord puisée.

Les chapelets peuvent être mus non-seulement par des hommes, mais aussi par des chevaux à l'aide d'un manége, et même par des roues hydrauliques et des machines à vapeur.

196. *Noria.* Cette machine n'est autre chose qu'un chapelet vertical dans lequel la buse et les palettes sont remplacées par des seaux fixés à une chaîne sans fin, et dont la capacité est ordinairement de 7 à 8 litres et va quelquefois à 15 litres.

Dans une noria, afin que les seaux puissent se vider, on est obligé de monter l'eau à un niveau supérieur à celui auquel on veut l'élever; de là il résulte que pour obtenir un travail utile Ph, on est obligé, abstraction faite des différentes résistances passives, de produire un travail

$$P(h+h').$$

P poids d'eau élevé;
h hauteur à laquelle on veut élever l'eau;

h' excès de hauteur à laquelle on est obligé d'élever l'eau pour que les seaux versent à un niveau convenable; sa valeur est ordinairement égale à 0m,75; c'est le rayon du cercle circonscrit à l'exagone qui sert de tambour, augmenté de 0m,10 à 0m,20.

La valeur de h' restant constante quelle que soit celle de h, le rapport de l'effet utile au travail dépensé augmentera à mesure que la hauteur h sera plus grande; c'est du reste ce que confirment les résultats pratiques du tableau suivant, obtenus avec une noria dans laquelle on avait $h' = 0^m,75$. La machine était mue par de forts ouvriers produisant sur des manivelles un effort de 9 kilog. avec une vitesse de 0m,75 à 0m,80 par seconde.

Valeur de h.	Rapport de l'effet utile à l'effet dépensé.
1m,00 à 2m,00	0,48
2 ,50 à 2 ,60	0,57
3 ,00 à 3 ,30	0,63
3 ,60 à 4 ,00	0,66

Une bonne noria, établie par M. Abadie, près de Toulouse, a pour tambour une lanterne à 6 fuseaux en fer de 0m,03 de diamètre; ces fuseaux sont espacés de 0m,45 et relient deux plateaux en fonte dont l'écartement est de 0m,43. L'axe du tambour est en fer, et a 0m,054 d'équarrissage. La chaîne a 13m,72 de longueur, et elle est formée de 28 chaînons portant chacun un seau en feuilles de cuivre de 15 litres de capacité.

La surface du bassin qui reçoit l'eau est à 0m,07 au-dessous de l'axe du tambour, et à 5m,13 au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard. Un cheval ordinaire de jardinier fait fonctionner cette machine et produit un effet utile équivalent à 118 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur par heure; admettant, avec M. d'Aubuisson, que dans ce même temps le travail produit par un cheval attelé à un manége équivaut à 144 mètres cubes d'eau élevés à un mètre, l'effet utile est donc les 0,82 du travail dépensé.

D'après Navier, une noria manœuvrée par deux chevaux aurait élevé 70,12 mètres cubes d'eau à 3m,60 de hauteur, ce qui équivaut à 126 mètres cubes à 1 mètre par cheval; l'effet utile serait donc les 0,88 du travail dépensé. Il convient de ne compter que sur un effet utile égal aux 0,70 ou 0.80 du travail dépensé.

Outre l'effet utile considérable rendu par la noria, elle a encore l'avantage de pouvoir servir à élever les eaux bourbeuses, comme le sont généralement les eaux d'épuisement, ce qui est impossible avec les chapelets.

197. *Roues élévatoires.* Ces roues, qui sont à palettes planes, agissent à la manière des chapelets; mais en se mouvant dans un coursier circulaire. Nous nous contenterons de donner les dimensions des

parties principales de celle qui a été établie pour élever les eaux de la Seine dans la gare de Saint-Ouen.

Diamètre extérieur de la roue.	$10^m,672$
Diamètre intérieur.	$10^m,672 - 1^m,648 = 9^m,024$
Longueur des aubes.	$1^m,216$
Hauteur des aubes, mesurée suivant ces aubes, qui sont un peu inclinées sur le rayon . . .	$0^m,90$
Hauteur des aubes, mesurée suivant le rayon. .	$0^m,824$
Nombre d'aubes.	36

D'après des observations faites par M. Walter de Saint-Ange, cette roue élève 2500 mètres cubes d'eau à 4 mètres de hauteur en une heure; la force de la machine étant supposée être de 45 chevaux, le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé est 0,82; mais il eût été convenable d'évaluer exactement la force de la machine.

198. *Roues à seaux ou à godets.* Ces roues, employées fréquemment aux irrigations et aux usages domestiques, à cause de leur grande simplicité et de leur peu d'entretien, sont à aubes planes, dont un plus ou moins grand nombre portent des coffres fermés aux deux extrémités et garnis sur une face d'une ouverture qui permet l'entrée et la sortie de l'eau. Par le mouvement de la roue, les coffres puisent successivement l'eau dans le courant moteur même, et viennent la verser dans une auge placée latéralement vers le sommet de la roue.

Les coffres, à moins de régler convenablement leur ouverture, perdent toujours à leur sortie du courant une partie de l'eau d'abord puisée; de plus, le versement ne s'opère qu'à un niveau supérieur au point auquel on doit élever l'eau. C'est afin d'atténuer autant que possible ces causes de pertes d'effet utile que, dans l'application de ces roues aux grands épuisements, on a remplacé les coffres fixés aux aubes par des seaux ou godets mobiles autour d'un axe placé au-dessus de leur centre de gravité; par cette disposition, les godets ne perdent leur eau qu'au sommet de la roue où un taquet les fait verser.

Comme, pour les épuisements, l'eau élevée n'est pas prise dans le courant moteur, les godets sont montés sur une roue séparée de la roue motrice et formée de deux plateaux suffisamment écartés pour que les godets puissent être suspendus entre eux. Perronet a appliqué avec beaucoup de succès une machine semblable aux fondations du pont de Neuilly. Le diamètre de la roue motrice était $5^m,85$, la longueur des aubes $6^m,50$, la hauteur des aubes $0^m,97$, et le diamètre des roues à godets $5^m,36$. La roue à aubes avait été placée en un point fixe où la vitesse du courant était de $0^m,81$, et la roue à godets a été successivement portée sur les emplacements des diverses piles jusqu'à une distance de 35 mètres. La capacité de chacun des seize godets montés sur la roue était de 137 litres; mais la quantité d'eau qui arrivait au point de versement n'était que de 103 litres. La quantité d'eau élevée à $3^m,25$ et

$3^m,90$ de hauteur était de 185 mètres cubes par heure; c'est le même effet utile que celui fourni par douze chapelets verticaux employés au même pont.

199. *Tympan*. La machine de ce nom, employée par les anciens, était simplement un tambour en bois divisé en huit ou en un plus grand nombre de compartiments par des cloisons dirigées suivant le rayon. Chaque compartiment portait, sur le contour du tambour, une ouverture qui permettait à l'eau d'entrer dans le compartiment quand cette ouverture était noyée. Comme cette ouverture était placée sur la partie de la paroi convexe du tambour qui sortait la première de l'eau, une certaine quantité d'eau se trouvait emprisonnée, et le tambour en tournant l'élevait jusqu'à la hauteur de son axe. Des rainures pratiquées suivant la longueur de l'axe et se prolongeant dans un des fonds du tambour formaient des canaux qui permettaient à l'eau de sortir.

Lafaye, au commencement du siècle dernier, a imaginé de courber les cloisons suivant les développantes du cercle extérieur de l'axe (*Int.*, 954); ce qui a permis de supprimer l'enveloppe convexe du tambour. Par cette disposition, la verticale passant par le centre de gravité de la masse d'eau contenue dans chaque canal courbe est tangente à l'axe, et, quelle que soit la position du tympan, le rayon de son axe est le bras de levier constant de la résistance; d'où il résulte que le travail est aussi régulier que possible. D'après des expériences de Perronet, un de ces tympans, ayant $5^m,85$ de diamètre, portant 24 cloisons et plongeant de $0^m,24$ dans l'eau, faisait deux tours et demi par minute et élevait 123 mètres cubes d'eau à $2^m,60$ par heure. La machine était mue par douze hommes marchant sur une roue à chevilles montée sur son axe; d'où il résulte un effet utile équivalent à 26,67 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur par heure et par homme. Avec un chapelet vertical, manœuvré, il est vrai, à l'aide de manivelles (36), cet effet utile n'a été que de 17,40 mètres cubes. Cette machine, qui peut aussi être mue par une roue hydraulique, a l'inconvénient de n'élever l'eau qu'à la hauteur de son axe; ce qui oblige de lui donner des dimensions qui la rendent lourde et embarrassante.

Dans ces derniers temps, M. Cavé a construit plusieurs tympans de très-grandes dimensions, complétement en tôle de $3^{mm},5$ environ d'épaisseur rivée sur des cornières en fer, avec arbre en fer ou en fonte.

M. Cavé a fait des tympans à 4 cloisons courbées en spirale d'Archimède; mais les derniers sont à 2 cloisons, et les spires se rapprochent du centre plus rapidement que dans la spirale, assez pour que la surface de l'eau qui y est emprisonnée reste constamment tangente à la spire supérieure. Un de ces tympans à deux spires, fonctionnant dans de bonnes conditions, avait les proportions suivantes :

Plus grand rayon	3m,50
Largeur intérieure	1m,00
Plus courte distance de l'extrémité de chaque spire à la spire voisine	0m,75
Diamètre des ouvertures laissant sortir l'eau	1m,00
Profondeur à laquelle la roue plonge	1m,00
Nombre de révolutions de chaque spire	2
Mètres cubes d'eau puisés par chaque spire pour un tour	2m,00
Nombre de tours par minute	10
Mètres cubes d'eau élevés par heure	2400m,00
Hauteur à laquelle l'eau est élevée, environ	2m,00

Pour un débit aussi considérable, on fait verser l'eau pas les deux joues du tympan, lequel, au lieu de plonger de 1 mètre, plonge souvent de 1m,20 à 1m,30, ce qui augmente considérablement le volume d'eau élevé. Ainsi, d'après M. Cavé, le tympan faisant de 10 à 12 révolutions par minute, ce volume aurait été de 3333 mètres cubes par heure, à la hauteur de 2 mètres environ, pour une puissance moyenne de 30 chevaux.

200. *Baquetage à bras.* Des épuisements de peu de durée, et qui doivent être faits de suite, s'exécutent quelquefois à l'aide de seaux ou baquets manœuvrés par des hommes placés dans le bassin à mettre à sec. D'après Perronet, un homme n'élève que 68 litres d'eau à un mètre de hauteur par minute, et moitié seulement si la hauteur d'élévation est de 1m,80 ; ce qui donne, pour un travail journalier de huit heures, un effet utile moyen de 31 000km ; M. Morin donne 46 000km quand l'homme travaille avec un seau léger, 48 000km s'il travaille avec une écope ordinaire, et 120 000km si c'est avec une écope hollandaise.

201. *Seau à bascule.* Lorsqu'on n'a à élever, dit M. d'Aubuisson, qu'une petite quantité d'eau de 5 à 6 mètres de profondeur, pendant une ou deux heures de la journée, on emploie avec avantage un seau suspendu à une des extrémités d'un grand balancier en bois, à l'autre extrémité duquel on place un poids faisant équilibre à la charge. De cette manière, un homme, selon l'habitude qu'il a de ce genre de travail, produit un effet équivalent à 12 ou 15 et même 20 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur par heure. M. Morin donne seulement, par homme, pour un travail journalier de huit heures, 60 000km quand le puits a de 2 à 3 mètres de profondeur, et 70 000km si cette profondeur est de 4 à 5 mètres.

202. *Seau manœuvré à l'aide d'un treuil.* Lorsque la profondeur du puits est considérable, on fait usage d'une corde, à chacune des extrémités de laquelle est fixé un seau, et s'enroulant sur le treuil dont il a été parlé n° 122. M. d'Aubuisson, d'après ses observations et des résultats donnés par Coulomb, admet que, le treuil étant manœuvré par des hommes agissant sur des manivelles, chaque homme produit, dans un travail journalier de huit heures, un effet utile de 160 000km.

Lorsque la corde passe seulement sur une poulie, et qu'elle est directement tirée à mains d'homme, d'après Coulomb, l'effet utile journalier n'est que de 71 000^{km}.

203. *Manége du maraîcher.* Cette machine, qui a la plus grande analogie avec la précédente, se compose d'un tambour, fait généralement avec deux vieilles roues de voiture, sur le pourtour desquelles on a fixé des douves de tonneau allant de l'une à l'autre sans être parallèles à l'axe; ce qui donne une espèce d'hyperboloïde de révolution, qui empêche la corde de s'échapper, tout en donnant un treuil régulateur (122). Ce tambour est monté sur l'arbre vertical d'un manége, que l'on maintient par une charpente qui sert en même temps à fixer sur le puits deux poulies sur lesquelles viennent passer les deux brins de la corde.

Hachette rapporte, dans son traité des machines, qu'avec un manége de maraîcher, établi sur un puits de 32^m,50 de profondeur, un cheval élevait par minute un seau contenant 90 litres d'eau, d'où il résulte que pour huit heures de travail l'effet utile serait de 1 404 000^{km}; mais si la durée du travail était de huit heures par jour, cet effet utile serait diminué (36).

204. *Vis d'Archimède.* Dans les vis ordinaires employées aux épuisements, on place trois hélices sur le même noyau (*Int.*, 976). Le diamètre extérieur des hélices est égal à trois fois celui du noyau, et il varie entre 0^m,325 et 0^m,65. La longueur de la vis varie entre douze et dix-huit fois le diamètre extérieur des hélices, selon que ce diamètre est plus ou moins fort.

Les constructeurs de Paris font ordinairement égal à 60° l'angle de la tangente à l'hélice tracée sur le noyau avec la génératrice de ce noyau; les anciens Romains le faisaient de 45°; à Toulouse il est de 54° environ, et Eytelwein l'a fait de 78° dans une petite vis de construction soignée, destinée à faire des expériences.

L'inclinaison de l'axe de la vis avec l'horizon peut varier de 30° à 45°, et la vis fonctionne le plus avantageusement lorsque le niveau de l'eau s'élève un peu au-dessus du centre de la base du noyau, sans immerger complétement cette base.

Résultats obtenus par M. Lamandé, avec une vis d'Archimède ayant les dimensions suivantes :

Longueur de la vis	5^m,85
Diamètre extérieur	0^m,49
Inclinaison de la vis à l'horizon	35°
Nombre de tours de la vis par minute	40
Hauteur à laquelle l'eau était élevée	3^m,30
Quantité d'eau élevée à 3^m,30 par heure	45$^{m.cub.}$

Comme la vis était manœuvrée par deux compagnies de chacune neuf hommes, travaillant par relais de deux heures, l'effet produit

était donc équivalent à 16^{mc},50 d'eau élevés à 1 mètre de hauteur, par heure et par homme. Comme la durée du travail journalier n'était que de cinq heures, on voit que l'effet utile journalier était très-faible.

On peut admettre qu'un ouvrier manœuvrant une vis d'Archimède bien disposée, peut produire un effet utile équivalant à 15 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure, et travailler six heures par jour; il peut même travailler huit heures sur vingt-quatre, si l'épuisement est continu et les relais bien disposés.

En Hollande et en Allemagne on remplace souvent le canon, c'est-à-dire l'enveloppe extérieur des hélices, par un coursier demi-circulaire fixe. Par cette disposition, le poids du canon et celui de l'eau qui se trouve dans la vis ne reposent plus sur les pivots, et ne tendent pas à produire directement la flexion du noyau; mais il faut marcher avec une grande vitesse, pour que la perte d'eau entre les hélices et le coursier ne soit pas considérable. Ces machines sont presque toujours mues par des moulins à vent.

MOULINS A VENT.

205. *Moulins à vent.* La pression exercée par le vent contre une surface plane normale à la direction de son mouvement est, pour des vitesses inférieures à 10 mètres par seconde,

$$P = 0,11 d s^{1,1} v^2, \qquad (a)$$

ou à peu près

$$P = ds \times 2h.$$

P pression en kilogrammes;
d poids d'un mètre cube de l'air en mouvement;
s surface de la plaque en mètres carrés;
v vitesse du vent en mètres par seconde, ou vitesse relative de choc de l'air contre le disque si l'un et l'autre sont en mouvement (*Int.*, 1156);
$h = \frac{v^2}{2g}$ hauteur génératrice de la vitesse v (18).

La première valeur de P fait voir que la pression croît dans un rapport plus grand que la surface choquée. D'après Borda, trois plaques dont les surfaces étaient entre elles comme les nombres 1, 2,25 et 5,06 ont donné des pressions qui étaient entre elles comme les nombres 1, 2,44 et 5,97; valeurs qui croissent à peu près comme les puissances 1,1 des surfaces (*Int.*, 433 et 435).

Lorsque le vent frappe une surface suivant un certain angle, la pression qu'il exerce sur cette surface, dans la direction de son mouvement, est, d'après Hutton,

$$0,11 d s^{1,1} v^2 (\sin i)^{1,84 \cos i}. \qquad (b)$$

i angle qui fait la direction du vent avec la surface.
Les autres lettres ont les mêmes significations que dans le cas précédent.

Si l'angle i est droit, on a $\cos i = 0$, $\sin i = 1$, d'où $(\sin i)^{1,84 \cos i} = 1$, et la formule (*b*) n'est plus autre chose que la formule (*a*), ce qui devait être.

***TABLEAU** des pressions exercées par le vent à différentes vitesses contre une surface d'un mètre carré, choquée directement, d'après la formule (a).*

DÉSIGNATION DES VENTS.	VITESSE par seconde.	PRESSION par mètre carré.
	m.	k.
Vent faible	2.00	0.54
Vent frais ou brise (tend bien les voiles)	6.00	4.87
Vent le plus convenable aux moulins	7.00	6.64
Bon frais (convenable pour la marche en mer)	9.00	10.97
Grand frais (fait serrer les hautes voiles)	12.00	19.50
Vent très-fort	15.00	30.47
Vent impétueux	20.00	54.16
Tempête	24.00	78.00
Tempête violente	30.05	122.28
Ouragan	36.15	176.96
Grand ouragan	45.30	277.87

Les résultats de ce tableau supposent la pression barométrique égale à $0^m,755$ de mercure, et la température égale à $12°$; ce qui donne $d = 1^k,231$. Quand $s = 1$, on a aussi $s^{1,1} = 1$.

Un vent dont la vitesse est inférieure à 4 mètres par seconde n'est pas suffisant pour qu'un moulin à vent puisse moudre le blé, et si la vitesse dépasse 8 mètres, on est obligé de commencer à serrer les voiles.

D'après Smeaton, un moulin à vent donne le maximum d'effet quand ses ailes sont des surfaces gauches dont les génératrices, situées aux points obtenus en divisant la longueur de l'aile en 6 parties égales, font avec l'axe de la roue ou la direction du vent les angles désignés dans le tableau suivant. (La génératrice n° 1 est celle qui se trouve au point de division le plus rapproché de l'axe; c'est en ce point que commence la voilure.)

NUMÉROS des génératrices.	ANGLES avec l'axe.	ANGLES avec le plan du mouvement des ailes.	OBSERVATION.
1	72°00	18°00	Les angles de la seconde et de la troisième colonnes sont complémentaires.
2	71 00	19 00	
3 } milieu de l'aile.	72 00	18 00	
4	74 00	16 00	
5	77 50	12 50	
6	83 00	7 00	

Une différence de quelques degrés avec les valeurs du tableau est sans influence sur l'effet produit.

La largeur de l'aile est ordinairement comprise entre le 1/5 et le 1/6 de la longueur, et elle n'en doit jamais dépasser le 1/4.

L'aile, au lieu d'être rectangulaire, a quelquefois la forme d'un trapèze, dont le côté parallèle situé à l'extrémité de l'aile est égal au 1/3 de la longueur de l'aile et à 1,66 fois le côté parallèle intérieur; le côté parallèle extérieur est divisé par l'axe de l'aile en deux parties, qui sont le rapport 5:3. L'un des grands côtés du trapèze est parallèle au bras de l'aile. Il convient du reste de disposer les divers éléments de l'aile trapézoïdale en surface gauche, comme pour l'aile rectangulaire.

D'après Smeaton, les ailes d'un moulin à vent étant bien airées, lorsqu'elles marchent sans charge la vitesse de leur extrémité est égale à 4 fois celle du vent, et cette vitesse doit être égale à 2,5 ou 2,7 fois celle du vent pour que le moulin rende le maximum d'effet.

Smeaton conclut aussi de ses expériences que les charges sont à peu près proportionnelles aux carrés des vitesses du vent; ainsi les vitesses étant dans le rapport de 1 à 2, les charges ont crû dans celui de 1 à 3,75. De là il résulte que les effets produits sont à peu près dans le rapport des cubes des vitesses du vent; c'est aussi ce que confirment les expériences de Smeaton, dans lesquelles les vitesses étant dans le rapport de 1 à 2, les effets ont été dans celui de 1 à 7,02.

L'effet dynamique en kilogrammètres par seconde d'un moulin à vent est assez bien représenté par l'expression

$$nSV^3.$$

n coefficient qui est égal à 0,05 d'après des expériences rapportées par Smeaton, où l'on avait $s = 0^{m.c.},2607$; des expériences faites par Coulomb, sur un grand moulin à vent construit aux environs de Lille, ont donné $n = 0,03$. Dans les cas ordinaires de la pratique, il conviendra d'adopter cette dernière valeur de n, en ne considérant toutefois les résultats fournis par la formule que comme des approximations;

S surface des quatre ailes en mètres carrés;

V vitesse du vent en mètres par seconde.

L'expression de l'effet utile rendu par un moulin à vent est la même que pour celui rendu par une roue pendante (184); la différence ne consiste que dans la valeur du coefficient numérique.

Dimensions des parties principales d'un moulin à vent.

Équarrissage de l'arbre.	$0^m,50$ à $0^m,60$
Inclinaison de l'arbre à l'horizon.	10° à 15°
Longueur des ailes, mesurée depuis l'axe de rotation.	10 à 12 mètres.
Équarrissage des axes des ailes près de l'arbre. . . .	$0^m,30$
Espacement des petits barreaux implantés dans l'axe de l'aile et sur lesquels on étend les voiles.	$0^m,40$
Surface ordinaire de chaque aile.	20 mètres carrés.

Dans plusieurs localités on rencontre des moulins à vent de 2, 3, et même 4 paires de meules pour moudre le blé, avec tous les appareils de nettoyage et de blutage.

M. Herpin a fait établir dans le département de l'Indre un moulin à vent de trois paires de meules de diamètres différents, et disposé pour faire fonctionner une scie circulaire et une huilerie, et à côté, sous un hangar, une machine à battre.

M. Herpin a fait remplacer la voilure ordinaire, qui était difficile à manœuvrer, par la voilure en planches mobiles du système Berton.

Hauteur du centre de rotation des ailes au-dessus du sol. . .	14^m,80
Diamètre au bas de la tour, qui est octogonale et formée par 8 poteaux en bois de 12^m de hauteur reposant sur des dés en pierre de 1^m de hauteur.	8^m,00
Diamètre de la tour, au sommet des poteaux.	5^m,50
Distance du centre de rotation à l'extrémité des ailes.	10^m,00
Longueur des planches formant voilure	8^m,00

Chaque voilure est composée de 11 planches en sapin de 0^m,01 d'épaisseur, 0^m,25 de largeur, et 8^m de longueur, qui peuvent se rapprocher plus ou moins, à la manière des deux branches de la règle parallèle du dessinateur, de manière à former un parallélogramme plus ou moins large. Les ailes sont planes et ont une largeur qui peut varier de 2^m à 2^m,50. Le plan des ailes fait un angle d'environ 18° avec le plan du mouvement. Les meules et accessoires marchent le plus convenablement quand la volée, ayant toute sa voilure, fait 11 à 12 tours par minute, ce qui correspond à une vitesse d'environ 5 à 6 mètres par seconde pour le vent.

La construction de ce moulin est revenue à 19600 fr.

M. Herpin estime que l'on peut moudre et bluter au moins 2500 hectolitres de blé par année; mais exploité pour son compte par des gens qui prennent plus ou moins ses intérêts, le produit n'a guère dépassé 2000 hectolitres.

100 kilogrammes de blé froment de deuxième qualité, pesant 72 kilogrammes l'hectolitre, ont donné, dans une expérience faite par M. Herpin :

Farine plus ou moins blanche.	72^k,600
Farine bise.	6 ,800
Recoupes.	4 ,200
Sons.	15 ,700
Déchet.	0 ,700
Total.	100 ,000

206. *Travail d'un moulin à vent appliqué à une huilerie ou employé à la mouture du blé, et travail des moulins à blé ordinaires.* Les expériences de Coulomb, citées au numéro précédent, ont été

faites sur un moulin à vent faisant marcher les pilons d'une huilerie. Les cames sont montées sur l'arbre du moulin; elles communiquent directement le mouvement à 5 pilons pesant chacun 510 kilogr. destinés à broyer la graine de colza, et à deux autres pesant chacun 250 kilogr. destinés à serrer et desserrer les coins qui séparent, par compression, l'huile de la gangue. Il n'y a jamais qu'un de ces derniers pilons qui marche à la fois; mais les 5 autres fonctionnent simultanément quand le vent le permet. L'élévation verticale des pilons est de 0m,49, et chacun de ceux mis en mouvement s'élève deux fois par tour du moulin.

TABLEAU des résultats fournis par trois expériences de Coulomb.

VITESSE DU VENT par seconde.	NOMBRE DE TOURS par 1'.	POIDS ÉLEVÉ A 0m.49 par tour.	EFFET UTILE par 1'.
m.		k.	k. m.
2.27	3	1020	1499
4.06	7,5	2540	9334
6.50	13	5600	35672

A la vitesse de 6m,50 on marche avec toutes les voiles sans que la machine se fatigue; mais passé cette limite, on commence à carguer les voiles.

L'effet utile en chevaux-vapeur transmis par l'arbre du moulin dans la troisième expérience est, en négligeant les frottements et les chocs des pilons (94), $\frac{35672}{4500} = 7,9$ chevaux. La surface utile de chaque aile ayant 10 mètres de longueur sur 1m,95 de largeur, ce qui fait 78 mètres carrés pour les 4 ailes, la surface de voilure est donc de 10 mètres carrés environ par force de cheval. Dans la deuxième expérience, cette surface était de 40 mètres carrés environ.

Un relevé du travail de plusieurs années a fait voir que chaque moulin fabrique moyennement 40000 kilogr. d'huile par an. Le travail transmis aux pilons par 100 kilogr. d'huile fabriqués étant de 14000 à 15000 grandes unités dynamiques (33), en admettant avec Coulomb que les frottements et les chocs des pilons absorbent le 1/6 environ du travail transmis à ces pilons. Il en résulte que la fabrication seule de 100 kilog. d'huile exige moyennement 12000 grandes unités dynamiques. M. Morin rapporte que les meules d'un moulin à huile pesant 3000 kilog., l'arbre vertical faisait 6 tours par minute, le poids de graine chargé à chaque rechange de 10' était de 25 kilog., le poids de la graine broyée en un jour était de 1500 kilog., et la quantité d'huile fabriquée en 12 heures, 600 kilog. Le travail transmis par l'arbre mo-

teur étant de 205 kilogrammètres par seconde, il en résulte que par ce procédé la fabrication de 100 kilog. d'huile n'absorbe que 1476 grandes unités dynamiques, c'est-à-dire le 1/10 environ de celui absorbé par l'emploi des pilons.

D'après Coulomb, on peut admettre que le travail annuel d'un moulin à vent n'est que le 1/3 environ de celui qu'il produirait en marchant d'une manière continue dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire sous l'action d'un vent de $6^m,50$ à 7 mètres de vitesse par seconde.

Coulomb ayant soumis à l'expérience un moulin à blé dont la meule faisait 5 tours pour une révolution des ailes, il a reconnu que le mouvement ne commençait à avoir lieu que quand la vitesse du vent atteignait 4 mètres, et que cette vitesse ayant atteint $5^m,80$, les ailes faisaient de 11 à 12 tours par minute, et la quantité de blé moulu sans être bluté était de 400 à 450 kilog. à l'heure.

Hachette rapporte que dans un moulin de Corbeil, mû par une roue à aubes transmettant 1321 grandes unités dynamiques par heure, la meule ayant 2 mètres de diamètre, et faisant 67 révolutions par minute, la quantité de farine brute (son et farine mélangés) produite a été de 200 kilog. en une heure 15 minutes. Ce résultat prouve que Coulomb a dû se tromper dans l'évaluation du blé moulu par un moulin à vent. Des résultats de Hachette il résulte que la mouture à la grosse de 100 kilog. de blé absorbe 825 grandes unités dynamiques.

M. d'Aubuisson conclut, des résultats obtenus par différents observateurs, que la force que doit transmettre l'arbre d'une roue hydraulique commandant un moulin est au moins de 3 chevaux par hectolitre de blé de 75 kilog. à moudre par heure; c'est 1080 grandes unités dynamiques par 100 kilogr. de blé.

Les meules le plus généralement adoptées aujourd'hui en France; dans les moulins à l'anglaise, ont $1^m,30$ de diamètre et $0^m,27$ d'épaisseur; elles sont percées à leur centre d'un trou de $0^m,27$ à $0^m,33$ de diamètre, appelé *œillard*. La profondeur des rayons n'est pas de plus de 5 à 6 millimètres; ils sont formés en plan incliné, afin de présenter d'un côté une arête tranchante qui coupe les grains de blé, pour en faciliter le broiement complet. On a généralement reconnu qu'une vitesse de 110 à 120 révolutions par minute était convenable pour des meules de $1^m,30$; au-dessus, on a à craindre l'échauffement de la farine.

Dans les usines bien organisées des environs de Paris, rapportent MM. Cartier et Armengaud, les meules de $1^m,30$ de diamètre, faisant 115 à 120 révolutions par minute, ne moulent en moyenne que 15 à 16 hectolitres de blé en 24 heures, en produisant il est vrai de 60 à 65 pour 100 de cette farine première si recherchée par la boulangerie parisienne. La force nécessaire par paire de meules dans ces conditions, y compris nettoyage et blutage, est de deux chevaux et demi (le produit

est moyennement de 20 à 22 kilog. par force de cheval et par heure). Ainsi pour une puissance effective de 15 chevaux on établira 6 paires de meules, y compris celle qui peut être en rhabillage, et cette opération s'effectuant à peu près régulièrement tous les 5, 6 ou 7 jours au plus, sur les 6 paires, il y en aura donc presque constamment une d'arrêtée. Un bon meunier s'arrange du reste pour que cette opération soit bien et promptement exécutée, et autant que possible pendant le jour.

Dans un grand nombre de localités, comme Lyon et Dijon, on rapproche moins les meules qu'à Paris; elles produisent plus de rondes ou de secondes que de premières; on leur fait alors moudre 24 à 25 hectolitres de blé en 24 heures, et même plus, et chaque paire de meules absorbe la force de trois chevaux (le produit est de 25 à 26 kilogrammes par force de cheval et par heure).

Pour les manutentions militaires les meules travaillant encore moins rapprochées, et le nettoyage et le blutage étant moins parfaits, chaque paire moud de 30 à 32 hectolitres en 24 heures et exige une puissance effective de 3 chevaux et demi (le produit correspond à 28 ou 30 kilog. par force de cheval et par heure).

Dans les moulins des États-Unis d'Amérique, les meules ont généralement $1^m,50$ de diamètre, font 100 tours par minute, et, d'après les observations d'Évans, la quantité de blé moulue est de 1,76 hectolitre par heure, et la force du moteur de 3 chevaux par hectolitre.

Dans un moulin à l'anglaise des environs de Paris, le relevé d'une mouture de 3320 setiers de blé pesant ensemble 417452 kilog. a donné les résultats suivants :

Farines, 1re et 2e qualité	0,720
Id., 3e et 4e	0,023
Cribiures	0,007
Issues diverses	0,215
Déchets, évaporations, balayures	0,035
Total	1,000

ÉCOULEMENT DES GAZ.

207. *Écoulement des gaz.* (Consulter, pour l'analogie, l'écoulement de l'eau, nos 129 et suivants.) L'expérience prouve que les volumes d'un même poids d'un même gaz, sous des pressions différentes et à des températures différentes, sont entre eux dans le rapport inverse des pressions, et dans le rapport direct des volumes que prend l'unité de volume à 0° en passant aux températures du gaz. De là il résulte que les poids d'un même volume ou les densités d'un même gaz, sous des pressions différentes et à des températures différentes, sont entre eux dans le rapport direct des pressions et dans le rapport inverse des

volumes de l'unité de volume à 0°, ramenés aux températures du gaz ; ainsi, le poids d'un mètre cube d'air à 0° et sous la pression 0m,76 étant 1k,293, à la température de $t°$ et sous la pression h il est

$$1^k,293\,\frac{h}{0,76}\,\frac{1}{1+0.003665t}=1,702\,\frac{h}{1+0.003665t}.$$

0,003665 coefficient de dilatation de l'air (2e partie) ;
$1 + 0,003665t$ volume que prend l'unité de volume à 0°, en passant à la température $t°$.

L'air de l'atmosphère contient toujours de la vapeur d'eau, et d'autant plus que sa température est plus élevée; comme cette vapeur diminue sa densité, dans les applications on peut prendre pour le poids d'un mètre cube d'air atmosphérique.

$$1.7\,\frac{h}{1+0.004t}.$$

Lorsqu'un gaz s'échappe d'un vase où il est comprimé, il s'écoule avec une vitesse

$$v=\sqrt{2gh'}=\sqrt{2gh\frac{\delta}{\delta'}}.$$

v vitesse d'écoulement ;
h' hauteur génératrice de la vitesse v, exprimée en gaz qui s'écoule ;
h pression marquée par le manomètre ;
$h'=h\frac{\delta}{\delta'}$;
δ densité du liquide placé dans le manomètre ;
δ' densité du gaz comprimé.

La dépense théorique, c'est-à-dire le volume de gaz qui s'écoulerait par un orifice s'il n'y avait pas contraction de la veine, est

$$q=sv=s\sqrt{2gh\frac{\delta}{\delta'}}.$$

q dépense théorique ;
s section de l'orifice d'écoulement.

La dépense effective est toujours moindre que la dépense théorique ; ainsi on a

$$Q'=kq=ks\sqrt{2gh\frac{\delta}{\delta'}}.$$

Q' dépense effective en air comprimé ;
k coefficient de la dépense ; sa valeur dépend de la forme de l'orifice d'écoulement. D'après les expériences de M. d'Aubuisson, sur des orifices en mince parot de 0m,01 à 0m,03 de diamètre, $k=0,63$ pour les plus petits orifices, $k=0,673$ pour les plus grands, et $k=0,65$ en moyenne pour les

orifices compris entre ces limites. Pour les mêmes orifices garnis d'ajutages cylindriques de diamètres égaux aux leurs, et d'une longueur de 4 centimètres pour ceux de 0m,01, et de 0m,08 pour ceux de 0m,03, *k* a été à peu près constant, et égal en moyenne à 0,920.

M. d'Aubuisson a voulu se rendre compte de l'influence de la longueur de l'ajutage sur la valeur de *k*, et en opérant sur des tubes de 0m,015 de diamètre, il a obtenu les résultats suivants :

LONGUEUR de l'ajutage.	VALEUR DE *k*.	DÉPENSE EFFECTIVE par seconde.
m.		m. cub.
0.022	0.938	0.00728
0.045	0.924	0.00700
0.162	0.838	0.00028
0.325	0.738	0.00570

Pour des ajutages coniques dont le diamètre à la sortie était moitié de celui de l'entrée, et compris dans les limites de 0m,01 à 0m,03, les longueurs de ces ajutages étant de 0m,04 pour ceux de 0m,01 de diamètre à la sortie, et de 0m,08 pour ceux de 0m,03, la valeur de *k* a été à peu près constante et égale en moyenne à 0,93.

Pour les ajutages courts, peu convergents et de 0m,015 de diamètre à la sortie, M. d'Aubuisson a obtenu pour *k* les valeurs du tableau suivant :

ANGLE de convergence.	LONGUEUR de l'ajutage.	VALEUR MOYENNE de *k*.
	m.	
0° 20′	0.045	0.938
18 54	*id.*	0 917
53 8	*id.*	0.798
11 24	0.025	0.947
28 4	0.010	0.880

Ce tableau fait voir que des ajutages courts et peu convergents sont favorables à la dépense, et que l'angle de convergence ne dépassant pas 10 à 12°, il convient de faire $k = 0,94$.

Pour les buses, on devrait faire $k = 0\ 94$, valeur qui convient à leur angle de convergence; mais, à cause de leur longueur et afin de n'être pas en défaut pour la dépense, on devra faire $k = 0,93$ dans le calcul de leur section.

Q étant la dépense effective en air comprimé, cette dépense ramenée à la pression atmosphérique sera

$$Q = Q' \frac{H + h}{H}.$$

Q volume d'air écoulé, ramené à la pression atmosphérique ;
H pression atmosphérique ;
h pression manométrique ;

Les pressions H et h sont exprimées en hauteurs de même liquide, c'est ordinairement en mercure.

CONDUITES D'AIR.

208. *Conduites d'air.* (Nos 161 et suivants.) De même que l'eau, l'air exerce un frottement contre les parois des tuyaux dans lesquels il circule. Ce frottement diminue la force élastique depuis l'origine du tuyau jusqu'à la fin, et cette diminution, c'est-à-dire la perte de hauteur manométrique, a la même expression que pour l'eau; ainsi, en négligeant le terme contenant la première puissance de la vitesse de l'air dans le tuyau, ce que l'on peut faire, d'après les expériences de Hutton, pour des vitesses comprises entre 3 et 100 mètres, on peut poser

$$H - h = n' \frac{Lv^2}{D}.$$

Formule que M. d'Aubuisson transforme en cette autre :

$$H - h = n \frac{hLd^4}{D^5}. \qquad (1)$$

n' coefficient ;
v vitesse moyenne de l'air dans le tuyau ; elle n'est jamais supérieure à 50 mètres et rarement inférieure à 3 mètres ;
H hauteur indiquée par le manomètre placé à l'origine de la conduite ;
h hauteur indiquée par le manomètre placé à l'extrémité de la conduite ;
n coefficient qui est égal, d'après les expériences de M. d'Aubuisson sur des tuyaux en fer-blanc de 0m.0235 à 0m.10 de diamètre, à 0.0238 en moyenne ; cette valeur suppose que la buse ou l'ajutage placé à l'extrémité de la conduite donne lieu à un coefficient de dépense égal à 0.93, comme cela a lieu généralement (207) ;
L longueur de la conduite ;
d diamètre de la buse ou de l'ajutage par lequel l'air s'écoule ;
D diamètre de la conduite.

De la formule précédente on tire

$$H = h\left(1 + \frac{nLd^4}{D^5}\right).$$

H pression que doit indiquer le manomètre placé à l'origine de la conduite pour que l'air s'échappe par la buse avec une vitesse due à la hauteur h exprimé en air comprimé, c'est-à-dire à la hauteur $h' = h \frac{\delta}{\delta'}$ (207). Cette

vitesse n'est pas inférieure à 80 mètres par seconde pour les hauts fourneaux marchant au charbon de bois, et à 150 mètres pour ceux marchant au coke.

M. d'Aubuisson a aussi donné l'expression de la dépense d'une conduite; elle est

$$Q = 1870\sqrt{\frac{1+0.004t}{b+h}}\sqrt{\frac{HD^5}{L+42\frac{D^5}{d^4}}}.$$

Q volume d'air à $t°$ et sous la pression $b+h$, écoulé par seconde;
b pression atmosphérique;
0,004 coefficient de dilatation du gaz (207).

Si la conduite est entièrement ouverte à l'extrémité, on a $d = D$, et en faisant égal à 1 le coefficient de la dépense 0.93 dans le facteur 1870, la formule précédente devient

$$Q = 2011\sqrt{\frac{1+0.004t}{b+h}}\sqrt{\frac{HD^5}{L+42D}}.$$

Des expériences faites par M. Girard sur une conduite de $0^m,01579$ de diamètre, formée de canons de fusil adaptés bout à bout, ont donné

$$Q = 1989\sqrt{\frac{1+0.004t}{b+h}}\sqrt{\frac{HD^5}{L+42D}}.$$

Comme, dans ces cas d'écoulement à l'air libre, on peut supposer $h = 0$, et par suite $b + h = 0^m,76$, on a, en faisant $t = 12°$, température moyenne de la France,

$$Q = 2336\sqrt{\frac{HD^5}{L+42D}}.$$

Pour l'eau, M. d'Aubuisson donne pour l'expression de la dépense Q' dans les grandes vitesses,

$$Q' = 76,45\sqrt{\frac{HD^5}{L+36D}}.$$

On a donc à peu près

$$Q' : Q :: 76,45 : 2336 :: 1 : 30,55.$$

C'est-à-dire que, sous une même charge, une même conduite dépense, en volume, 30.55 fois plus d'air que d'eau.

Pour un autre gaz quelconque les dépenses Q seront obtenues en divisant les valeurs précédentes données pour l'air par $\sqrt{\delta''}$, δ'' étant la densité du gaz qui s'écoule par rapport à celle de l'air; ainsi pour le gaz de l'éclairage ce sera par $\sqrt{0,559}$.

La résistance des coudes est sensiblement proportionelle au carré de la vitesse du fluide et au carré du sinus de l'angle du coude; mais M. d'Aubuisson, dans ses expériences, a reconnu qu'au delà d'un certain nombre de coudes, la résistance ne croissait plus proportionnellement à leur nombre, et qu'elle diminuait quand ce nombre augmentait; ainsi quinze coudes ont donné moins de résistance que sept de même grandeur. Sept coudes à 45° ont diminué la dépense de 1/4. En pratique, on évitera le mauvais effet des coudes en arrondissant bien ceux qu'on ne pourra éviter.

MACHINES SOUFFLANTES.

209. *Machines soufflantes.* Pour les machines soufflantes à cylindre en fonte, le rapport du volume d'air expulsé au volume engendré par le piston est égal à 0,75, et pour les machines à caisse carrée en bois, ce rapport est égal à 0,55 seulement.

Désignant par Q le volume effectif d'air, à 0° et sous la pression 0m,76, que doit fournir la machine en une minute, on calcule le diamètre et la course du piston pour fournir un volume

$$Q\,(1+at).$$

a coefficient de dilatation de l'air, qu'on suppose égal à 0.004 (207);
t température de l'air; en France on fait $t=20°$.

Le volume engendré par un piston cylindrique et par un piston carré est respectivement en une minute (*Int.*, 576 et 603)

$$\frac{1}{4}\pi D^2 ln, \quad \text{et} \quad C^2 ln.$$

D diamètre du piston cylindrique;
l course du piston;
n nombre de coups de piston par minute;
C côté du piston carré.

On aura donc pour les deux genres de machines

$$Q\,(1+0.004t)=0.75\,\frac{1}{4}\,\pi D^2 ln, \quad \text{et} \quad Q(1+0.004t)=0.55C^2 ln.$$

Faisant $t=20°$, on conclut

$$D^2=1.834\,\frac{Q}{ln}, \quad \text{et} \quad C^2=1.964\,\frac{Q}{ln}.$$

Pour les machines à cylindre, la vitesse du piston varie de 0m.50 à 1 mètre par seconde, et on fait ordinairement $l=D$.

Désignant par v la vitesse du piston, on a $nl = 60v$, et par suite,

$$D^2 = 1.834\,\frac{Q}{60v} = 0{,}031\,\frac{Q}{v}.$$

Pour les machines à cylindre, la section des soupapes d'aspiration varie de 1/15 et 1/12 de la section du cylindre soufflant pour des vitesses de piston comprises entre $0^m,50$ et $0^m,75$, et de 1/10 à 1/9 pour des vitesses comprises entre $0^m,75$ et 1 mètre. Il ne convient pas que la vitesse dépasse $0^m,60$.

Pour les machines à caisse carrée, la vitesse du piston varie de $0^m,25$ à $0^m,30$ par seconde, et la section des soupapes d'aspiration est comprise entre le 1/15 et le 1/20 de celle de la caisse.

Pour les machines à cylindre, comme pour celles à caisse, la section des soupapes d'expiration varie de 1/15 à 1/20 ou 1/22 de celle du cylindre ou de la caisse.

Les tuyaux de conduite ont une section à peu près égale à celle des soupapes d'expiration. Dans la pratique, la vitesse de l'air y est ordinairement réglée à 20 mètres par seconde.

Les pistons des caisses en bois sont mis en mouvement par des cames, et leur course n'excède pas $0^m,65$.

Le diamètre de la tige du piston varie de 1/20 à 1/17 de celui du cylindre.

La pression de l'air dans le cylindre doit être suffisante pour soulever la soupape, vaincre le frottement dans le tuyau qui conduit l'air du cylindre au régulateur, celui qui peut avoir lieu dans le régulateur, ainsi que celui qui a lieu dans le tuyau qui amène l'air du régulateur à la buse, et produire une vitesse d'écoulement convenable par la buse. D'après ce qui a été dit nº 208, on pourra calculer les différentes pertes de force élastique dues au frottement de l'air dans les tuyaux, et comme on peut, avec approximation, tenir compte de l'effet de la soupape, on aura donc la pression absolue de l'air dans le cylindre.

Dans une machine soufflante, l'équilibre dynamique est, pour une minute,

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_r.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur dépensé par minute sur la tige du piston soufflant;
$\mathcal{T}_u$ travail absorbé pour comprimer l'air à la pression P dans le cylindre, et le faire sortir de ce cylindre;
$\mathcal{T}_r$ travail absorbé par le frottement de la garniture du piston et celui de la tige dans le stuffingbox, et pour soulever les soupapes.

Pour une cylindrée, on a

$$t_u = qp \times 2.3026 \log \frac{P}{p}.$$

q volume d'une cylindrée ;
p pression atmosphérique ; c'est sensiblement la pression de l'air derrière le piston.

Tant que $\frac{P}{p}$ est plus petit que 2, on peut supposer

$$2.3026 \log \frac{P}{p} = \frac{P - p}{0.50(P + p)},$$

et il vient

$$t_u = qp \frac{P - p}{0.5(0P + p)}.$$

Pour un mètre carré de surface,

$$p = 0{,}76 \times 13596^k \text{ , et } P = (0.76 + h)13596 \text{ kilog.}$$

h hauteur marquée par le manomètre à mercure placé sur le cylindre (43).

Substituant ces valeurs de p et P dans celle de t_u, on a

$$t_u = q \times 13596 \frac{1.52h}{1.52 + h}.$$

Q' étant le volume engendré par le piston en une minute, on a

$$Q(1 + 0.004t) = 0.75Q',$$

d'où on tire

$$Q' = \frac{Q}{0.75}(1 + 0.004t).$$

On a

$$nq = Q',$$

et par suite,

$$nt_u = \mathcal{T}_u = Q' \times 13596 \frac{1.52h}{1.52 + h} = \frac{Q}{0.75}(1 + 0.004t)13596 \frac{1.52h}{1.52 + h}.$$

Le frottement de la garniture du piston dépendant de la pression, il faudrait tenir compte des variations de pression de l'air dans le cylindre; mais il convient de supposer la pression constante et égale à h, ce qui permet de négliger le frottement de la tige dans le stuffing-box, et on a alors (64)

$$\mathcal{T}_r = n\pi Dehfl,$$

d'où

$$\mathcal{T}_m = \frac{Q}{0.75}(1 + 0.004t)13596 \frac{1.52h}{0.52 + h} + n\pi Dehfl.$$

Il convient de prendre $e = 0^m.04$ et de faire $f = 0.30$.

Le travail absorbé par le stuffing-box a la même expression que T_r ; mais e se prend alors égal au diamètre de la tige, et on a $f=0.20$ environ.

D'après MM. Thomas et Laurens, l'air que la tuyère doit projeter dans le haut fourneau est celui nécessaire à la conversion en oxyde de carbone, du charbon *solide* chargé au gueulard, c'est-à-dire du charbon déduction faite des cendres, de l'eau et des matières volatiles.

Un kilogramme de charbon solide exigeant $4^{mc},41$ d'air à 0° sous la pression $0^m,76$ pour sa conversion en oxyde, comme le charbon de bois moyen, contient 0,07 d'eau, 0,025 de cendres et 0,14 de matières volatiles, chaque kilogramme de charbon chargé au gueulard exigera $4,41 \times 0,765 = 3^{mc},374$ d'air.

Un coke moyen contenant 0,05 d'eau, 0,03 de matières volatiles et 0,12 de cendres, les tuyères devront envoyer $4,41 \times 0,80 = 3^{mc},528$ d'air à 0° et à la pression $0^m,76$ par chaque kilogramme de coke chargé au gueulard.

De ces nombres, il résulte que pour une marche régulière la tuyère doit envoyer par minute $11^{mc},241$ d'air à 0° et à la pression $0^m,76$ dans un haut fourneau produisant 4000 kilog. de fonte par jour avec une consommation de 1200 kilog. de charbon de bois par tonne. Ce volume d'air est de $68^{mc},600$ pour un haut fourneau produisant 20 tonnes de fonte par jour avec une consommation de 1400 kilog. de coke par tonne.

Si l'on avait à craindre des pertes par suite d'un refoulement de l'air à la tuyère, on y obvierait en portant la consommation de $4^m,41$ à $4^m,60$.

La capacité utile d'un régulateur à eau varie de dix à douze fois celle du cylindre soufflant; sa section horizontale se fait égale à celle de l'eau environnante. L'eau doit toujours s'élever à $0^m,30$ au-dessus de l'arête inférieure du régulateur, afin qu'on soit assuré qu'il ne s'échappera pas d'air. La capacité d'un régulateur à cylindre flottant varie de deux à trois fois celle du cylindre soufflant; celle d'un régulateur à capacité constante varie de vingt à vingt-cinq fois celle de ce cylindre.

VENTILATEURS.

210. 1° *Ventilateur aspirant*. Si les orifices de sortie de ce ventilateur étaient égaux aux orifices d'entrée, et si l'air n'éprouvait aucune résistance pour pénétrer entre les ailes, ni contre ces ailes, la vitesse de sortie de l'air serait égale à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes. A cause des phénomènes compliqués qui ont lieu dans le ventilateur, il a été impossible jusqu'à présent de donner une expression analytique satisfaisante de son effet. La théorie a conduit M. Combes à courber les ailes; mais jusqu'à présent on a donné la préférence aux ventilateurs à ailes planes, qui sont d'une construction plus facile.

Il convient de faire le diamètre extérieur du ventilateur double du diamètre intérieur. La distance des joues doit être égale au rayon intérieur si l'air arrive par les deux joues, et moitié seulement si l'air n'arrive que par un côté. Le nombre convenable d'ailes est six. (Consulter la deuxième partie.)

2° *Ventilateur soufflant.* Les phénomènes qui se passent dans ce ventilateur sont encore plus compliqués que dans le précédent. Nous nous contenterons de donner ici les résultats fournis par deux ventilateurs soufflants, à ailes planes légèrement inclinées sur le rayon; le premier à MM. Sudds, Barker et compagnie, de Rouen; le deuxième à M. Martin, aussi de Rouen.

NOMBRE d'ailes.	DIAMÈTRE extérieur.	DIAMÈTRE intérieur.	ÉCARTEMENT des joues.	CUBILOTS desservis.	NOMBRE de tours en 1'.	FORCE en chevaux vapeur.	PRODUIT total en fonte, par heure.
6	m. 1.0	m. 0.50	m. 0.20	2	1000	4	kilog. 4000
»	1.4	0.40	0.35	2	600	4	»

Il convient de faire aspirer les ventilateurs par les deux joues, et de tenir leur diamètre entre les limites $0^m,90$ et $1^m,10$.

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

211. *Résistance à la traction.* Lorsqu'un corps solide est tiré dans le sens de sa longueur, il s'allonge d'une certaine quantité, variable pour chaque nature de corps, mais proportionnelle, pour une même matière, à la longueur de la pièce et à l'effort de traction, et inversement proportionnelle à la section transversale de cette pièce.

Cette loi n'est vraie qu'autant que la charge ne produit pas un allongement supérieur à celui que peut atteindre la pièce sans cesser de reprendre sa longueur primitive quand l'effort cesse son action. Ce plus grand allongement correspond à ce qu'on appelle la limite d'élasticité, limite qu'il ne faut jamais dépasser ni même atteindre dans la pratique.

L'allongement que prend un corps soumis à la traction est alors donné par la formule

$$i = \frac{P}{EA}, \quad \text{d'où } E = \frac{P}{Ai}, \quad \text{et } P = iEA.$$

i allongement du corps par mètre de longueur de la pièce, dans la limite d'élasticité, en mètres;

P effort qui tend à allonger le corps, en kilogrammes;

A section transversale du corps, en millimètres carrés;
E quantité constante pour une même nature de corps, et qu'on nomme *coefficient* ou *module d'élasticité*; c'est le poids, exprimé en kilogrammes, qui serait capable, si cela était possible, d'allonger un corps prismatique, de matière homogène et d'un millimètre carré de section, d'une quantité égale à sa longueur primitive, en supposant que l'allongement ne cesse pas d'être proportionnel à la charge. Pour le mètre carré de section, la valeur de E est un million de fois plus grande.

Ce qui précède peut se répéter pour la compression.

M. Poncelet a formé le tableau suivant, qui donne, pour différents corps, les valeurs moyennes de E, ainsi que celles de *i* et de P correspondant à la limite d'élasticité de ces corps.

DÉSIGNATION DES CORPS.	VALEUR de *i*.	VALEUR de P pour 1 millim. carré de section.	VALEUR de E pour 1 millim. carré de section.
	m.	kil.	kil.
Chêne	$\frac{1}{600}$ = 0.00167	2.00	1200
Sapin jaune ou blanc	$\frac{1}{850}$ = 0.00117	2.17	1854
Sapin rouge ou pin	$\frac{1}{470}$ = 0.00210	3.15	1500
Mélèze ou larix	$\frac{1}{520}$ = 0.00192	1.73	900
Hêtre rouge	$\frac{1}{570}$ = 0.00175	1.63	930
Frêne	$\frac{1}{885}$ = 0.00113	1.27	1120
Orme	$\frac{1}{414}$ = 0.00242	2.35	970
Fers doux passés à la filière, de petites dimensions	$\frac{1}{1250}$ = 0.00080	14.75	18000
Fers en barres	$\frac{1}{1520}$ = 0.00066	12.205	20000
Fers du Berry, étirés *	»	»	20869
Fers du Berry, recuits *	»	»	20784
Acier d'Allemagne, très-bonne qualité, recuit à l'huile	$\frac{1}{835}$ = 0.00120	25.00	21000
Acier fondu très-fin, trempé, recuit à l'huile	$\frac{1}{4500}$ = 0.000222	66.00	30000
Acier fondu, étiré *	»	»	19549
Acier fondu, recuit *	»	»	19561
Acier anglais en fil, étiré *	»	»	18809
Acier anglais en fil, recuit *	»	»	17278
Acier ordinaire recuit au blanc *	»	»	18045
Fonte de fer à grains fins	$\frac{1}{1200}$ = 0.00083	10.00	12000
Fonte grise ordinaire, anglaise, bonne qualité	$\frac{1}{1400}$ = 0.00078	6.00	9096
Fils de cuivre étirés	»	»	12000
Fils de cuivre recuits *	»	»	10500

* Expériences de M. Wertheim.

DÉSIGNATION DES CORPS.	VALEUR de *i*.	VALEUR de P pour 1 millim. carré de section.	VALEUR de E pour 1 millim. carré de section.
	m.	kil.	kil.
Fils de laiton recuits.	$\frac{1}{742}=0.00135$	15.00	10000
Laiton fondu.	$\frac{1}{1320}=0.00076$	4.80	6450
Bronze de canon fondu.	$\frac{1}{1590}=0.00063$	2.00	3200
Fil de plomb de coupelle, étiré à froid, de 4 mill. de diamètre.	$\frac{1}{1490}=0.00067$	0.40	600
Fil de plomb impur, du commerce, étiré à froid, de 6 millim. de diam.	$\frac{1}{2000}=0.00050$	0.40	800
Plomb fondu ordinaire	$\frac{1}{477}=0.00210$	1.00	500
Étain*.	»	»	3200
Zinc *.	»	»	9600
Or étiré *.	»	»	8131
Or recuit *.	»	»	5585
Argent étiré *.	»	»	7358
Argent recuit *.	»	»	7140
Platine, fil moyen *.	»	»	17044
Platine, fil moyen, recuit *. .	»	»	15518

A l'aide de ce tableau et de la loi posée au commencement de ce numéro, on déterminera facilement l'allongement d'un corps du tableau, de section et longueur données, soumis à une charge aussi donnée.

Ainsi, sous une traction de 3000 kilog., une barre de fer de 500 millimètres carrés de section et de 8 mètres de longueur s'allongera de

$$0,00066 \times 8 \times \frac{3000}{12,205} \times \frac{1}{500} = 0^{m},0026.$$

Dans la pratique, il convient de ne soumettre les pièces qu'on ne peut éprouver directement avant leur emploi qu'à des charges permanentes qui ne dépassent pas la moitié de celles correspondant à la limite d'élasticité ; on ne devra dépasser cette moitié que pour les cas de constructions non permanentes et non soumises à des efforts longtemps prolongés, et il ne convient, dans aucun cas, que les charges dépassent les 3/4 de celles correspondant à cette limite. Il convient, toutes les fois que cela est possible, de faire usage de cette règle pour determiner les dimensions des pièces de construction.

Quant au cas où l'on se trouve parfaitement éclairé sur les qualités et la nature de la matière, lorsque surtout on est certain de sa parfaite homogénéité, on peut augmenter les charges jusqu'à celles qui sont voisines de la limite d'élasticité ; c'est ce que font les compagnies qui se livrent spécialement à la construction des ponts suspendus.

TABLEAU des résultats des expériences de MM. Chevandier et Wertheim, sur les bois des Vosges.

DÉSIGNATION DES BOIS.	VALEUR DE *i*.	VALEUR de P pour 1 millimètre carré de section.	VALEUR de E pour 1 millimètre carré de section.
	m.	k.	k.
Acacia.	0.00253	3.188	1261.9
Sapin.	0.00193	2.153	1113.2
Charme.	0.00118	1.282	1085.7
Bouleau.	0.00162	1.617	997.2
Hêtre.	0.00236	2.317	980.4
Chêne à glands pédonculés.	»	»	977.8
Chêne à glands sessiles.	0.00254	2.349	921.8
Pin silvestre.	0.00289	1.633	564.1
Orme.	0.00158	1.842	1165.3
Sycomore.	0.00098	1.139	1163.8
Frêne.	0.00111	1.246	1121.4
Aune.	0.00101	1.121	1108.1
Tremble.	0.00096	1.035	1075.9
Érable.	0.00105	1.068	1021.4
Peuplier.	0.00195	1.007	517.2

VALEURS du coefficient d'élasticité et de la charge de rupture par millimètre carré dans les deux sens perpendiculaires aux fibres (bois des Vosges).

DÉSIGNATION DES BOIS.	VALEUR E.		CHARGE DE RUPTURE.	
	Dans le sens du rayon.	Dans le sens perpendiculaire au rayon du cylindre.	Dans le sens du rayon.	Dans le sens perpendiculaire au rayon du cylindre.
	k.	k.	k.	k.
Charme.	208.4	103.4	1.007	0.608
Tremble.	107.6	43.7	0.171	0.414
Aune.	98.3	59.4	0.329	0.175
Sycomore.	134.9	80.5	0.522	0.610
Érable.	157.1	72.7	0.716	0.371
Chêne.	188.7	129.8	0.582	0.406
Bouleau.	81.1	155.2	0.823	1.063
Hêtre.	269.7	159.3	0.885	0.752
Frêne.	111.3	102.0	0.218	0.408
Orme.	122.6	63.4	0.345	0.366
Peuplier.	73.3	38.9	0.146	0.214
Acacia.	170.3	152.2	»	1.321
Sapin.	94.5	34.1	0.220	0.297
Pin silvestre.	97.7	28.6	0.256	0.196

Effort de rupture par traction. L'effort qui peut produire la rupture d'une pièce, en agissant dans le sens de sa longueur, est

$$P = Af.$$

- A section transversale de la pièce;
- f effort nécessaire pour rompre une tige de même matière que la pièce et dont la section est l'unité prise pour exprimer A.

TABLEAU des valeurs de f pour différents corps.

DÉSIGNATION DES CORPS.		VALEUR de f pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1m.m.c.
1° BOIS (a).			
		kil.	kil.
Chêne, dans le sens des fibres,	fort	8.00	0.800
	faible	6.00	0.600
Tremble,	id.	6.00 à 7.00	0.60 à 0.70
Sapin,	id.	8.00 à 9.00	0.80 à 0.90
Sapin des Vosges,	id.	4.00	0.400
Pin silvestre des Vosges,	id.	2.48	0.248
Frêne,	id.	12.00	1.200
Frêne des Vosges,	id.	6.78	0.678
Orme,	id.	10.40	1.040
Orme des Vosges,	id.	6.99	0.699
Hêtre,	id.	8.00	0.800
Teak,	id. employé aux constructions navales	11.00	1.100
Buis,	id.	14.00	1.400
Poirier,	id.	6.90	0.690
Acajou,	id.	5.60	0.560
Tremble des Vosges,	id.	7.20	0.720
Tremble, latéralement aux fibres (ou par glissement)		0.57	0.057
Sapin,	id. id.	0.42	0.042
Chêne, perpendiculairement aux fibres		1.60	0.160
Peuplier,	id.	1.25	0.125
Larix,	id.	0.94	0.094
Chêne ou sapin.	Pièces droites formées de morceaux assemblés par entailles en crémaillères.	4.00	0.400
	Arcs en planches de champ ou en bois plié	3.00	0.300
2° MÉTAUX (b).			
Fer forgé ou étiré en barres	Le plus fort, de petit échantillon	60.00	10.00
	Le plus faible, de très-gros échantillon	25.00	4.16
	Moyen	40.00	6.66

(a) En pratique, les pièces de bois ne peuvent être soumises à une traction permanente supérieure au 1/10 de celle de rupture; cette faible charge est due aux altérations auxquelles les bois sont sujets: ainsi l'expérience a appris que le bois de chêne, qui résiste cependant bien aux intempéries des saisons, ne peut être exposé plus de 25 à 30 ans à l'air libre, à la manière des pièces de ponts, sans être renouvelé.

(b) Dans la pratique il convient que la charge permanente des fers ne dépasse dans aucun cas le 1/3 de la charge de rupture, et qu'elle n'en soit que le 1/4 ou

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.		VALEUR de f pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 m.m.c.
		kil.	kil.
Fer ou tôle laminée..	Tiré dans le sens du laminage (Navier).	41.00	7.00
	Tiré dans le sens perpendiculaire (*id.*).	36.00	6.00
Tôles fortes corroyées dans les deux sens.		35.00	6.00
Fer dit *ruban*, très-doux.		45.00	7.50
Fil de fer non recuit.	De Laigle, employé à la carderie, de 0.23 de millimètre de diamètre.	90.00	15.50
	Le plus fort, de 0.5 à 1.0 millim. de diamètre.	80.00	13.33
	Le plus faible, d'un grand diamètre.	50.00	8.33
	Moyen, de 1 à 3 millim. de diamètre.	60.00	10.00
Fil de fer en faisceau ou câble (M. Bornet).		30.00	5.00
Chaînes en fer doux.	Ordinaires à maillons oblongs.	24.00	4.00
	Renforcées par des étançons.	32.00	5.33
Fonte de fer grise.	La plus forte, coulée verticalement.	13.50	2.25
	La plus faible, coulée horizontalement.	12.50	2.08
Acier.	Fondu ou de cémentation, étiré au marteau et en petits échantillons (1re qualité).	100.00	16.67
	Le plus mauvais, en barres de très-gros échantillons, mal trempé.	36.00	6.00
	Moyen.	75.00	12.50
Bronze de canons, moyennement.		23.00	3.83
Cuivre rouge laminé, dans le sens de la longueur (Navier).		21.00	3.50
Cuivre rouge de qualité supérieure (Trémery et Poirier Saint-Brice).		26.00	4.33
Cuivre rouge battu (Rennie).		25.00	4.17
Id. fondu (*id.*).		13.40	2.33
Cuivre jaune ou laiton fin (*id.*).		12.60	2.10
Arcs ou pièces d'assemblage en fer forgé ou en fonte grise.		25.20	4.20
Cuivre rouge en fil, non recuit.	Le plus fort, de moins de 1 millimètre de diamètre.	70.00	11.67
	Moyen, de 1 à 2 millim. de diamètre.	50.00	8.33
	Id. le plus mauvais.	40.00	6.67
Cuivre jaune (laiton) en fil non recuit.	Le plus fort, de moins de 1 millimètre de diamètre (Dufour).	85.00	14.16
	Moyen, de plus de 1 millimètre de diamètre (Ardant et Dufour).	50.00	8.33
Fil de platine écroui, non recuit, de 0.117 de millimètre de diamètre (Baudrimont).		116.00	19.33
Fil de platine recuit, d'après la mesure directe du diamètre.		34.00	5.67

le 1/5 et même le 1/6 quand les constructions sont de grande durée, et que l'on n'est pas suffisamment éclairé sur la qualité et l'homogénéité des fers. Pour la fonte, la charge permanente ne doit jamais dépasser le 1/4 de la charge de rupture, et encore doit-on éviter son emploi dans les constructions exposées à des chocs.

Le rapport des charges permanentes aux charges de rupture pour les autres métaux est le même que pour le fer ou la fonte, suivant que leur état se rapproche plus de celui de l'un ou de l'autre de ces métaux.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	VALEUR de f pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour $1^{m.m.c.}$
	kil.	kil.
Étain fondu (Rennie)	3.00	0.50
Zinc fondu	6.00	1.00
Zinc laminé	5.00	0.833
Plomb fondu (Rennie)	1.28	0.213
Plomb laminé (Navier)	1.35	0.225
Fil de plomb de coupelle, fondu, puis passé à la filière, ayant 4 millimètres de diamètre (Ardant)	1.36	0.227
3° CORDES (*c*).		
Aussières et grelins en chanvre de Strasbourg, de 13 à 14 millimètres de diamètre	8.80	4.40
Aussières et grelins en chanvre de Lorraine, de 13 à 17 millimètres	6.50	3.25
Aussières et grelins en chanvre de Lorraine ou de Strasbourg, de 23 millimètres	6.00	3.00
Aussières et grelins de Strasbourg, de 40 à 54 millim.	5.50	2.75
Cordages goudronnés	4.40	2.20
Vieille corde, de 23 millimètres	4.20	2.10
Courroie en cuir noir	»	0.20
4° MATIÈRES DIVERSES (*d*).		
Verre et cristal, en tubes ou en tiges pleines	2.48	0.248
Basalte d'Auvergne	0.770	0.077
Calcaire de Portland	0.600	0.060
Id. blanc d'un grain fin et homogène	0.144	0.0144
Id. à tissu compacte (lithographique)	0.308	0.0308
Id. à tissu arénacé (sablonneux)	0.229	0.0229
Id. à tissu oolithique (globuleux)	0.137	0.0137
Briques de Provence, très-bien cuites et d'un grain très-fin.	0.195	0.0195
Id. ordinaires, faibles	0.080	0.0080
Plâtre — gâché ferme	0.117	0.0117
Plâtre — *id.* moins ferme que le précédent	0.058	0.0058
Plâtre — *id.* fabriqué à la manière ordinaire	0.040	0.0040
Mortier — en chaux grasse et sable, âgé de 14 ans	0.042	0.0042
Mortier — en chaux grasse, mauvais	0.0075	0.00075
Mortier — en chaux hydraulique ordinaire et sable	0.0900	0.0090
Mortier — en chaux éminemment hydraulique	0.1500	0.0150
Mortier — de ciment de Pouilly et sable (parties égales), après un an de durcissement dans l'air ou dans l'eau	0.096	0.0096

(*c*) Pour les cordes, la charge permanente peut être la moitié de la charge de rupture. La rupture est précédée d'un allongement qui est le 1/6 de la longueur primitive; cet allongement est réduit à 1/10 si l'effort n'est que moitié de la charge maxima.

D'après Coulomb, la résistance d'une corde goudronnée n'est que les 2/3 ou les 3/4 de celle d'une corde blanche d'un même nombre de fils de caret, et, d'après Duhamel, la résistance d'une corde mouillée n'est que le 1/3 de celle de la même corde sèche.

(*d*) Ces matières ne sont employées qu'accidentellement pour résister à l'extension; la charge permanente qu'il convient de leur faire supporter est le 1/10 de la charge de rupture.

Passons maintenant en revue quelques expériences faites dans ces derniers temps.

1° Des expériences faites à Guérigny par M. Bornet sur une barre de fer à câble de 0m,0495 de diamètre et de 6m,42 de longueur, et d'autres faites par M. Ardant sur des fils de fer doux ou recuits et sur des fils durs ou non recuits ont donné les résultats du tableau suivant :

FER A CABLES, DUCTILE.		FIL DE FER.		
Charge par millimètre carré.	Allongement par mètre courant.	Charge par millimètre carré.	Allongement par mètre courant.	
			Fer doux recuit	Fer dur non recuit.
kil.	millim.	kil.	millim.	millim.
2	0.08	5	0.294	0.260
4	0.16	10	0.588	0.520
6	0.31	12	0.882	0.780
8	0.36	15	1.176	1.040
10	0.47	20	1.470	1.300
12	0.58	25	2.500	1.569
14	0.69	30	13.000	»
16	0.86	32.5	14.100	2.220
18	2.20	35.0	18.000	2.400
20	15.76	40.0	20.500	»
22	24.34	42.5	Rupture.	2.820
24	34.97	45.0	»	3.100
26	46.96	49.0	»	Rupture.
28	67.70	50.0	»	»
30	89.39			
32	132.48			
	Rupture.			

Ce tableau montre que jusqu'à une certaine limite, qu'on peut considérer comme la limite d'élasticité, l'allongement reste à peu près proportionnel à la charge, mais qu'au delà l'allongement augmente dans un rapport beaucoup plus grand que la charge. Il fait voir aussi quelle influence a le recuit sur la limite d'élasticité et la résistance à la rupture.

2° Des expériences faites avec beaucoup de soin par M. Eaton Hodgkinson sur des barres de fer de première qualité et de 0m,01313 de diamètre, assemblées bout à bout par des manchons, de manière à former un ensemble de 15 mètres de longueur, il résulte :

1° Que sous les charges inférieures à celle qui correspond à la limite d'élasticité il y a un allongement permanent;

2° Que, jusqu'à la charge de 14k,007 par millimètre carré, les allongements totaux croissent à peu près proportionnellement aux charges, et qu'il en est de même des allongements permanents, mais sans que ces derniers s'élèvent au plus

à la valeur, négligeable en pratique, d'un centième de millimètre par mètre, sous la charge de $14^k,997$;

3° Au delà de la charge de $14^k,997$, et surtout à partir de celle de $18^k,74$ par millimètre carré, les allongements, et surtout les allongements permanents, croissent très-rapidement et dans un rapport plus grand que les charges;

4° La valeur moyenne du module d'élasticité E a été de 19 359 458 500.

3° M. E. Hodgkinson a aussi fait des expériences sur des fontes de quatre localités anglaises. Les barres avaient 645 millimètres carrés de section et $3^m,05$ de longueur, assemblées bout à bout pour obtenir des longueurs de $15^m,25$. De ces expériences il résulte :

1° Que, jusqu'à la charge d'environ 6 kil. par millimètre carré, charge bien supérieure à celle que l'on atteint en pratique, les allongements totaux et les *allongements élastiques* (différences entre les allongements totaux et les allongements permanents) sont sensiblement proportionnels aux charges, mais cependant avec un peu plus d'écart que pour le fer;

2° Entre la charge de $0^k,74$ par millimètre carré de section et celle $5^k,92$ correspondant à un allongement de $0^m,000715$ par mètre ou de $\frac{1}{1400}$, la valeur moyenne du module d'élasticité est $E = 9\,096\,070\,000$, valeur qui diffère de 1/12 environ de la plus forte et de la plus faible.

4° Des expériences faites par M. E. Hodgkinson ont fait connaître que la résistance de la fonte à la rupture est la même que les hauts fournaux soient soufflés à l'air chaud ou à l'air froid. Cette résistance a été en moyenne de $11^k,245$ par millimètre carré de section. En 1815, MM. Minard et Desormes avaient trouvé $11^k,325$.

5° La difficulté d'obtenir des pièces épaisses de fonte bien pleines et bien saines à l'intérieur fait que dans les presses hydrauliques puissantes la fonte travaille parfois sous des charges très-rapprochées de celle de rupture.

6° M. Edwin Clark rapporte que des expériences faites sur des tôles pour chaudières ont donné en moyenne une résistance à la rupture par traction de $30^k,86$ par millimètre carré de section. Les épaisseurs de tôle ont varié de $0^m,0127$ à $0^m,0175$, et quoique de provenances diverses, les résistances n'ont pas varié sensiblement.

7° Des expériences faites pour déterminer l'influence du sens du laminage sur la résistance de la tôle ont donné en moyenne $31^k,48$ et $28^k,48$, suivant que la tôle est tirée parallèlement ou normalement au sens du laminage.

D'autres expériences faites dans le même but par M. Fairbairn, ingénieur de Manchester, ont donné $35^k,46$ et $35^k,25$ pour ces résistances moyennes, c'est-à-dire la même valeur.

8° Les rivets qui réunissent les plaques de tôle, les boulons d'assemblage des chaînes plates, ceux des poulies, des moufles, etc., résistent à un effort transversal ou de *cisaillement*.

Suivant que les boulons ou rivets réunissent 2, 3, 4...*n* plaques,

comme dans les moufles par exemple, il y a respectivement 1, 2, 3...$n-1$ points de cisaillement, et l'expérience prouve que la résistance est proportionnelle à ces nombres de points, et que cette résistance est sensiblement la même que si chaque section cisaillée résistait à un effort de traction longitudinal. En effet, des expériences ont donné une résistance moyenne au cisaillement de $36^k,69$ par millimètre carré, et la résistance du fer à l'extension a été trouvée de 36 à 40 kilog.

Des expériences faites par M. Fairbairn ont donné, selon que deux feuilles de tôles sont réunies par un simple rang de rivets ou par deux rangs dont les rivets de l'un se croisent avec ceux de l'autre, une résistance moyenne à la rupture de $29^k,67$ et $38^k,21$ par millimètre carré de la section de la tôle faite par les axes des trous ; cette dernière résistance est très-sensiblement celle de la tôle.

Quelques expériences cités par M. E. Clark tendent à faire estimer à 5000 ou 6000 kilog. le frottement produit par un seul rivet bien fait, remplissant bien son trou, et de 21 à 22 millimètres de diamètre ; ce qui l'a conduit à conclure que les solides formés par des tôles ainsi assemblées résistaient comme s'ils étaient d'une seule pièce. Cette estimation paraît un peu exagérée ; mais elle peut être admise dans la pratique, vu la faible charge que l'on fait supporter à la tôle, sauf à diminuer un peu le coefficient de résistance de la tôle.

MM. Gouin et Ce ont fait tourner des broches en fer corroyé, dit extra-martelé de Grenelle, et avec ils ont réuni deux tiges en acier trempé, dont l'une embrassait l'œil de l'autre par une fourchette bien assemblée ; ces tringles, soumises à des efforts de traction, ont donné les résultats suivants :

Diamètres des broches en millimètres. . .	8	10	12	16
Résistance moyenne des broches par millim.	$32^k,70$	$31^k,55$	$31^k,48$	$31^k,83$

Le même fer que les broches, tiré longitudinalement, ne s'est rompu que sous une charge de 40 kilog. par centimètre carré.

En rivant à chaud les broches qui ont donné $31^k,83$, le même appareil a fourni $32^k,55$ pour cette résistance. La faible différence de ces nombres ne serait-elle pas due à ce que les deux branches de la fourchette ne se rapprochaient pas facilement et étaient dans un certain état de poli.

212. Des vis à bois de $0^m,050$ de longueur, de $0^m,0056$ de diamètre en dehors des filets, et de $0^m,0028$ au noyau, engagées par 12 filets dans des planches de $0^m,027$ d'épaisseur, peuvent être chargées en toute sécurité de 35 kilog. pour le sapin, de 68 kilog. pour le chêne, de 71 kilog. pour le frêne sec, et de 59 kilog. pour l'orme.

213. *Résistance à l'écrasement.*

1° *Bois.*

D'après Rondelet, un cube de chêne chargé suivant la longueur de

ses fibres s'écrase sous une charge de 385 à 462 kil. par centimètre carré de section, et un cube de sapin sous celle de 439 à 462 kil.; de plus, cette charge de rupture reste à peu près la même tant que la longueur de la pièce ne dépasse pas 7 à 8 fois la plus petite dimension de la section transversale.

Des expériences faites par M. E. Hodgkinson sur trois cylindres en bois de teak de $0^m,0127$, $0^m,0254$ et $0^m,0508$ de diamètre, et d'une hauteur double du diamètre, prouvent que la résistance à l'écrasement est à très-peu près proportionnel à la section.

Le même expérimentateur rapporte les résultats suivants obtenus avec des cylindres de $0^m,0254$ de diamètre et de $0^m,0508$ de hauteur. Les premiers résultats sont relatifs à des bois à l'état ordinaire de sécheresse, et les seconds à des bois ayant séjourné pendant deux mois dans une espèce d'étuve.

ESSENCE DES BOIS.	RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT par centimètre carré.	
	Bois à l'état ordinaire.	Bois très-sec.
	kil.	kil.
Aune	480	489
Frêne	610	658
Laurier	528	528
Hêtre	543	658
Bouleau d'Amérique	»	820
Bouleau d'Angleterre	232	450
Cèdre	399	412
Pommier sauvage	457	502
Sapin rouge	404	463
Sapin blanc	477	513
Sureau	524	701
Orme	»	726
Sapin de Prusse	457	479
Horn beam	319	512
Acajou	576	576
Chêne de Québec	297	421
Chêne anglais	456	707
Chêne de Dantzick très-sec	»	543
Pin résineux	477	477
Pin jaune rempli de térébenthine	378	383
Pin rouge	379	528
Peuplier	218	360
Prunier	579	737
Sycomore	498	»
Teak	»	850
Larix	225	391
Noyer	426	508
Saule	203	431

D'après Rondelet, la résistance d'un cube de bois à l'écrasement étant

1, celle des poteaux sera représentée par les nombres du tableau suivant, dans lequel r désigne le rapport de la hauteur du poteau au côté de sa base.

Rapport r.	1	12	24	36	48	60	72
Résistance.	1	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{24}$

M. Morin, en représentant les résultats du tableau précédent par une courbe rectifiée, et en admettant avec Rondelet que la charge permanente des poteaux en bois peut s'élever au 1/7 de la charge de rupture, et que la résistance du cube de chêne est de 420 kil. par centimètre carré, a formé le tableau suivant des charges que l'on peut faire supporter aux poteaux :

Rapport r. . .	12	14	16	18	20	22	24	28	32	36	40	48	60	72
Charge en kil.	44.3	42.0	39.4	37.0	35.0	32.7	36.0	26.0	22.0	19.1	15.4	10.2	5.4	2.5

M. E. Hodgkinson a fait quelques expériences sur les poteaux en bois dont la longueur a varié de 30 à 45 fois le côté de la base, et il a reconnu que ses résultats étaient assez bien représentés, suivant que la section est carrée ou rectangulaire, par la formule

$$P = K\frac{b^4}{l^2} \quad \text{ou} \quad P = K\frac{ab^3}{l^2}.$$

P résistance à la rupture du poteau, en kilogrammes;
K coefficient constant, que M. Hodgkinson a trouvé égal à 2565 pour le chêne de Dantzick;
b côté de la section carrée ou petit côté de la section rectangulaire du poteau, en centimètres;
a grand côté de la section rectangulaire, en centimètres;
l hauteur du poteau en décimètres.

Dans les formules précédentes, on fera :

$K = 2565$ pour le chêne fort;
$K = 1800$ pour le chêne faible;
$K = 2142$ pour le sapin rouge et blanc fort et le pin résineux;
$K = 1600$ pour le sapin blanc faible et le pin jaune.

Pour ne faire travailler les pièces qu'au dixième de la charge de rupture, il suffit simplement de diviser par 10 les valeurs précédentes de K.

Avant M. Hodgkinson, MM. Navier et Duleau avaient déjà établi,

d'après des hypothèses, que théoriquement la résistance à l'écrasement est proportionnelle à

$$\frac{b^4}{l^2}, \text{ ou } \frac{ab^3}{l^2}, \text{ ou } \frac{d^4}{l^2},$$

selon que la section de la pièce est carrée, ou rectangulaire, ou circulaire d'un diamètre d.

M. Morin, en appliquant la formule précédente de M. Hodgkinson à un poteau de chêne fort de $0^m,15$ d'équarrissage, et en faisant $K = 256,5$, a obtenu les charges suivantes par centimètre carré :

Rapport r. . .	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40	48	60	72
Charge en kil.	178	131	100	79	64	44.5	32.8	25	19.8	16.0	11.1	7.1	4.9

Ce tableau peut être considéré comme étant d'accord avec celui de la page 254, déduit des expériences de Rondelet, pour les valeurs de r comprises entre 30 et 45, c'est-à-dire pour les valeurs qui ont servi à M. Hodgkinson pour établir sa formule; mais hors de ces limites, il y a un désaccord notable.

M. Morin cite en faveur de ce dernier tableau les poteaux du rez-de-chaussée du magasin aux blés de la Villette, qui ont $0^m,31$ sur $0^m,20$ d'équarrissage et une hauteur de 32 décimètres, ce qui donne $r = 16$, et qui ont très-bien supporté à plusieurs reprises, depuis plus de 12 ans et pendant des temps assez longs, une charge de 123 kilog. par centimètre carré; dans ces proportions, le tableau précédent ne donne que 100 kilog.

Malgré ces faits, quand il s'agit d'une matière aussi altérable que le bois, et en considération de ce que les expériences de M. Hodgkinson sont trop peu nombreuses, et qu'elles ont été faites sur des échantillons de choix, nous conseillons de ne pas atteindre les charges du tableau précédent hors des limites $r = 30$ à 45, surtout pour des constructions durables.

Les pilots enfoncés complétement dans le sol se chargent de 30 à 35 kilog., et même quelquefois plus, par centimètre carré de section (125).

Pour les constructions de durée, la charge permanente des bois ne doit pas dépasser le 1/10 de la charge de rupture des pièces dans les mêmes conditions, et pour les constructions temporaires ou de peu d'importance, le 1/6 ou le 1/5 au maximum.

2° *Fonte.*

Compression. M. E. Hodgkinson a soumis à la compression des barres de fonte de $3^m,05$ de longueur sur $6^{cent.c.},45$ de section; toutes les précautions étaient prises pour les empêcher de fléchir, et des résultats ob-

tenus, il résulte que, jusque vers la charge de $17^{k},41$ par millimètre carré de section, les compressions totales sont sensiblement proportionnelles aux charges, et que, jusqu'à la charge de $23^{k},27$, les compressions élastiques, c'est-à-dire les compressions totales moins les compressions permanentes, sont exactement proportionnelles aux charges. Les compressions permanentes sont tellement faibles jusque vers les charges de 10 à 12 kil. par millimètre carré qu'elles sont négligeables dans la pratique.

Le coefficient d'élasticité par compression a été en moyenne, jusqu'à la charge de $17^{k},41$,

$$E = 8\,804\,764\,000. \qquad (\text{n}^{\circ}\ 211)$$

Cette valeur n'a différé au maximum que de 1/22 de celle qui s'en est le plus écartée.

Comme on a pour l'extension $E = 9\,096\,070\,000$ (page 251), on peut donc supposer que dans les limites de charges de la pratique la fonte résiste également à l'extension et à la compression, et prendre pour E la moyenne des deux valeurs precédentes, c'est-à-dire 8 950 417 000.

Les expériences antérieures à celles de M. E. Hodgkinson avaient conduit à faire $E = 12\,000\,000\,000$ pour les fontes grises à grains fins (page 244).

Charge de rupture. Des expériences de M. E. Hodgkinson, il résulte que la résistance à la rupture est sensiblement constante pour des hauteurs de pièces variant de 1 à 5 fois la plus petite dimension de la section transversale; en deçà la résistance est plus grande, et au delà elle diminue considérablement à mesure que ce rapport augmente. Des expériences sur 18 espèces de fonte ont donné une résistance moyenne de 6 321 kilog. par centimètre carré; mais comme cette résistance a varié de 3 965 à 11 153 d'une fonte à une autre, il y a donc lieu, dans la pratique, d'essayer les fontes que l'on veut employer. La résistance généralement admise jusqu'ici dans les ouvrages français est de 10 000 kilog., nombre qu'il paraît convenable de descendre à 8 000 kilog.

M. E. Hodgkinson a soumis à des efforts de rupture par compression des piliers en fonte des forges de Low-Moor, Yorkshire, du n° 3, bonne qualité, à grains gris assez serrés et de dureté moyenne, d'une résistance maximum de 8 133 kilog. par centimètre carré, et de ses expériences, il a conclu que pour des colonnes dont la hauteur varie de 30 à 120 fois le diamètre, on a respectivement pour les colonnes pleines et les colonnes creuses

$$P = 10\,676\,\frac{d^{3,6}}{l^{1,7}} \quad \text{et} \quad P = 10676\,\frac{d^{3,6} - d'^{3,6}}{l^{1,7}}.$$

P effort de rupture en kilogrammes;

d diamètre de la colonne pleine ou diamètre extérieur de la colonne creuse, en centimètres;

d' diamètre intérieur de la colonne creuse, en centimètres;
l hauteur de la colonne en décimètres;

Pour des piliers plus courts, M. Hodgkinson donne la formule

$$P' = \frac{PR}{P + \frac{3}{4}R}.$$

P' effort de rupture, en kilogrammes;
P effort calculé par l'une des formules précédentes;
R résistance maximum du pilier proposé en supposant sa hauteur égale à 1 fois 1/2 son diamètre.

Comme dans la pratique il est prudent que les colonnes en fonte ne travaillent qu'au 1/6 de la charge de rupture, il faudra faire le coefficient numérique des formules précédentes égal à 1780.

Dans aucun cas, la charge permanente ne doit dépasser le 1/5 ou le 1/4 de celle de rupture.

En général on peut supposer que les fontes françaises ne s'écrasent que sous des charges d'environ 8000 kil. par centimètre carré; mais si l'on employait des fontes d'une résistance sensiblement différente, il suffirait de multiplier le coefficient numérique des formules précédentes par le rapport de la résistance de la fonte employée à la résistance 8133 kil.

M. Lowe a donné la formule suivante, plus simple que la précédente, représentant bien les résultats de M. Hodgkinson, s'appliquant à tous les piliers en fonte dont la hauteur varie de 4 à 120 fois le diamètre, et directement à une fonte quelconque,

$$P = \frac{R}{1,45 + 0,00337\left(\frac{l}{d}\right)^2}.$$

P charge de rupture;
R comme ci-dessus, résistance maximum du pilier supposé très-court;
l et d dimensions du pilier en centimètres.

Pour les piliers dont la hauteur l varie de 5 à 30 fois le diamètre d, M. Lowe a encore donné la formule plus simple

$$P = \frac{R}{0,68 + 0,1\frac{l}{d}}.$$

Supposant la résistance maximum de la fonte égale à 8000 kil. par centimètre carré, en la faisant travailler au 1/6 de cette charge, de ces formules on conclut le tableau suivant:

Rapport $r = \frac{l}{d}$	< 5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Charge en kil. . .	1333	746	476	297	195	169	98	74	58	46	38

Des expériences de M. E. Hodgkinson donnent pour le rapport moyen de la résistance à la rupture de la fonte par compression à la résistance par traction 6.593, et d'après cet auteur, il y a lieu de croire cette moyenne un peu faible; il pense qu'elle est comprise entre 7 et 8 pour une même fonte. D'autres expériences ne lui ont donné que 5.637 pour ce rapport moyen.

Qu'une même fonte ait été préparée à l'air froid ou à l'air chaud, sa résistance paraît être la même, soit à la traction, soit à la compression.

De ses expériences, M. E. Hodgkinson a conclu

1° Que la résistance à la rupture d'un pilier est réduite au 1/3 au moins quand l'effort qu'il supporte est dirigé suivant la diagonale et non suivant l'axe;

2° Que la résistance des piliers longs est 3 fois plus grande quand les extrémités sont plates et perpendiculaires à l'axe et à la direction de l'effort, que quand elles sont arrondies;

3° Qu'un pilier long, de section uniforme, dont les extrémités sont solidement fixées par des disques, des bases, ou de tout autre manière, présente la même résistance qu'un pilier de même section et d'une longueur moitié moindre, mais dont les extrémités seraient arrondies, même si l'effort était dirigé suivant l'axe;

4° Le renflement des colonnes vers le milieu de leur longueur n'augmente leur résistance que de 1/8 à 1/7.

3° *Fer*,

Compression. Des expériences de M. E. Hodgkinson, il résulte que jusque vers la charge de 1400 à 1800 kilog. par centimètre carré, la compression du fer est proportionnelle à la charge, et jusqu'à cette limite d'élasticité, le coefficient d'élasticité est en moyenne,

$$E = 16,295000000.$$

Cette valeur de E diffère peu de celle relative à l'extension (page 251), et comme pour la fonte on pourra les supposer égales lorsqu'il s'agira de la résistance à la flexion.

Cette valeur est presque double de celle trouvée pour la fonte (page 256). Ainsi dans les limites de la non altération de l'élasticité, 14 kil. par millimètre carré de section pour le fer, la fonte se comprime près de deux fois autant que le fer. A part le prix, il y a donc lieu de donner la préférence au fer sur la fonte.

Au dela de la limite d'élasticité, le fer se déforme beaucoup plus rapidement que la fonte, et il s'écrase sous des charges qui ne sont que la moitié et quelquefois le tiers de celles qui écrasent la fonte.

Charge de rupture du fer et de quelques autres métaux.

On admettait que des prismes courts en fer s'écrasaient sous des

charges de 4955 kilog. par centimètre carré de section; les dernières expériences semblent devoir faire porter ce chiffre à 4000 kil. pour le bon fer en barres laminé, et à 3800 environ pour les tôles de bonne qualité à cassure fibreuse ou cristalline, d'une épaisseur de 1/2 à 15 millimèt.

M. Lowe a donné pour les colonnes en fer des formules analogues à celles de la page 257 pour la fonte; elles sont, en conservant aux lettres les mêmes significations :

Pour des hauteurs comprises entre 10 et 180 fois le diamètre,

$$P = \frac{R}{1,55 + 0,0005\left(\frac{l}{d}\right)^2},$$

et pour des hauteurs comprises entre 5 et 30 fois le diamètre

$$P = \frac{R}{0,85 + 0,04\frac{l}{d}}.$$

Admettant que la résistance maximum du fer est 4000 kil. par centimètre carré, en faisant travailler ce métal au 1/5 de la résistance de rupture, des formules précédentes on conclut le tableau suivant :

Rapport $r = \frac{l}{d}$	>5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Charge en kil. . .	800	500	457	400	340	285	239	200	168	143	122

D'après des expériences de M. E. Hodgkinson, des supports en fer disposés de manière qu'ils ne puissent fléchir, comme par exemple ceux formés de tôles épaisses réunies par des cornières et formant des cellules rectangulaires, s'écrasent sous des charges de 2500 kil. par centimètre carré de section; en les faisant travailler du 1/6 au 1/4, soit en moyenne au 1/5 de la charge de rupture, on pourra donc les charger comme pour la traction d'environ 600 kil. par centimètre carré de section (page 251).

On admet que la résistance à l'écrasement est, par centimètre carré :

Pour le cuivre battu.	7245 kil.
Pour le cuivre jaune ou laiton. . .	11584
Pour l'étain coulé.	1087
Pour le plomb coulé.	540

4° *Pierres.*

Il convient de n'employer les matériaux du tableau suivant comme supports isolés que pour des hauteurs qui n'atteignent pas 12 fois la plus petite dimension de la section transversale.

TABLEAU des charges qui écrasent, après un temps très-court, différents corps, par centimètre carré de section. Ces résultats ont été obtenus en opérant sur des cubes ayant de 3 à 5 centimètres de côté. (Introduction à la Mécanique industrielle de M. Poncelet).

DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉ.	CHARGE.
PIERRES VOLCANIQUES, GRANITIQUES, SILICEUSES ET ARGILEUSES.		kil.
Basaltes de Suède et d'Auvergne.	2.95	2000
Lave dure du Vésuve (*piperno*), près Pouzzol.	2.60	590
Lave tendre de Naples.	1.97	230
Porphyre.	2.87	2470
Granit vert des Vosges.	2.85	620
Granit gris de Bretagne.	2.74	650
Granit de Normandie, dit gatmos.	2.66	700
Granit gris des Vosges.	2.64	420
Grès très-dur, blanc ou roussâtre.	2.50	870
Grès tendre.	2.49	4
Pierre porc ou puante (argileuse).	2.66	680
Pierre grise de Florence (argileuse, à grain fin).	2.56	420
PIERRES CALCAIRES.		
Marbre noir de Flandre.	2.72	790
Marbre blanc veiné, statuaire et turquin.	2.69	310
Pierre noire de Saint-Fortunat, très-dure et coquilleuse.	2.65	630
Roche de Châtillon, près Paris, dure et peu coquilleuse.	2.29	170
Liais de Bagneux, près Paris, très-dur, à grain fin.	2.44	440
Roche douce de Bagneux, près Paris.	2.08	130
Roche d'Arcueil, près Paris.	2.30	250
Pierre de Saillancourt, près Pontoise. 1re qualité.	2.41	140
Pierre de Saillancourt, près Pontoise. 2e qualité.	2.10	90
Pierre ferme de Conflans, employée à Paris.	2.07	90
Pierre tendre (lambourde et vergelée), employée à Paris, résistant à l'eau.	1.82	60
Lambourde de qualité inférieure, résistant mal à l'eau.	1.56	20
Calcaire dur de Givry, près Paris.	2.36	310
Calcaire tendre de Givry, près Paris.	2.07	120
Calcaire jaune oolithique de Jaumont, près Metz. 1re qualité.	2.20	180
Calcaire jaune oolithique de Jaumont, près Metz. 2e qualité.	2.00	120
Calcaire jaune d'Amanvillers, près Metz. 1re qualité.	2.00	120
Calcaire jaune d'Amanvillers, près Metz. 2e qualité.	2.00	100
Roche vive de Sauiny, près Metz (non rompue).	2.55	300
Roche jaune de Rozérieulles, près Metz.	2.40	180
Calcaire bleu à gryphite, donnant la chaux hydraulique de Metz (non rompue).	2.60	300
BRIQUES.		
Brique dure, très-cuite.	1.56	150
Brique rouge.	2.17	60
Brique rouge pâle (probablement mal cuite).	2.09	40
Brique de Hammersmith.	»	70
Brique de Hammersmith (brûlée ou vitrifiée).	»	100
Brique anglaise ou flamande tendre.	»	18

DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉ.	CHARGE.
PLATRES ET MORTIERS.		kil.
Plâtre gâché à l'eau.	»	50
Plâtre gâché au lait de chaux.	»	73
Mortier ordinaire en chaux et sable.	1.60	35
Mortier en ciment ou tuileaux pilés.	1.46	48
Mortier en grès pilé.	1.68	29
Mortier en pouzzolane de Naples ou de Rome.	1.46	37
Enduit d'une conserve antique, près de Rome.	1.55	76
Enduit en ciment des démolitions de la Bastille.	1.49	55
Béton en bon mortier, de 18 mois.	»	40
D'après les expériences de M. Vicat *sur des cubes de* 1 *centimètre de côté.*		
Pierre calcaire à tissu arénacé (sablonneuse).	»	94
Id. à tissu oolithique (globuleuse).	»	106
Id. à tissu compacte (lithographique).	»	285
Brique crue, ou argile séchée à l'air libre.	»	33
Plâtre ordinaire, gâché ferme.	»	90
Id. gâché moins ferme que le précédent.	»	42
Mortier en chaux grasse et sable ordinaire, âgé de 14 ans.	»	19
Id. hydraulique ordinaire.	»	74
Id. éminemment hydraulique.	»	144

Dans la pratique, la charge permanente qu'il convient de faire supporter aux matériaux du tableau précédent n'est que le 1/10 de celle qui produit la rupture; dans les constructions les plus légères elle ne dépasse pas le 1/6, et dans les constructions de moellons ou de petits matériaux, et souvent de pierres de taille, il convient de la réduire à 1/15 et même à 1/20; il en est de même pour les supports isolés dont le rapport de la hauteur à la plus petite dimension de la section transversale est très-grand.

On a remarqué que les pierres soumises à l'écrasement résistent d'autant mieux que leur section se rapproche davantage de la forme circulaire; ainsi, pour deux pierres d'égale hauteur, dont l'égale section était carrée pour la première et circulaire pour la deuxième, les résistances ont été dans le rapport des nombres 8 et 9. On a remarqué aussi que la résistance d'un cube étant 1, celle du cylindre inscrit était 0,80 quand il repose sur sa base, et 0,32 quand il repose sur une arête; et que celle de la sphère inscrite était 0,26.

214. *Section d'une bielle.* Pour les machines à basse pression, Watt fait la section de la bielle en fonte égale au 1/28 de celle du piston, ce qui correspond à une charge de 28 kilog. par centimètre carré; aux extrémités, la section est 1/35, et la charge 35 kilog.

Pour les bielles en fer forgé; la charge peut varier de 50 à 60 kilog. au milieu, et de 90 à 100 kilog. aux extrémités.

De ses expériences, M. E. Hodgkinson conclut qu'à section égale une bielle à section cruciforme, ordinairement employée, est moins résistante qu'une bielle à section annulaire dans le rapport de 18 à 40 environ.

215. *Résistance à un effort transversal d'une pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités et sollicitée à l'autre par une force unique* P. Le point d'encastrement étant évidemment celui où les fibres qui composent la pièce ont à supporter le plus grand effort, c'est pour ce point qu'il faut calculer les dimensions de la pièce, dont la résistance totale se compose de la somme des résistances à la traction et à la compression de toutes les fibres qui composent la section d'encastrement. Il faut dire à la traction et à la compression; car des fibres sont tirées, d'autres comprimées, et il y a une ligne de *fibres invariables* qui sépare les précédentes.

Ce qui va suivre suppose que la résistance à la traction est égale à la résistance à la flexion, ce qui n'est vrai que dans les limites d'élasticité, c'est-à-dire dans les limites où les raccourcissements et allongements sont égaux entre eux et proportionnels aux charges (211 et 213). Comme en pratique il ne faut jamais dépasser ces limites, les formules suivantes satisferont donc aux applications.

Le moment de résistance de la pièce, c'est-à-dire la somme des moments de résistance de toutes les fibres pris par rapport à la ligne des fibres invariables, est égal au moment de la force P pris par rapport à la section d'encastrement; on peut donc poser (*Int.*, 1055).

$$PL = \frac{RI}{n}. \qquad (1)$$

L bras de levier de la force P, ou distance du point d'encastrement de la pièce au point d'application de P;

$\frac{RI}{n}$ moment de résistance de la pièce;

R plus grande résistance à la traction et à la compression, sans dépasser la limite d'élasticité, des fibres qui composent la section d'encastrement de la pièce sollicitée perpendiculairement à sa longueur;

I moment d'inertie de la section d'encastrement pris par rapport à la ligne des fibres invariables; on le représente par $\int v^2 d\omega$, c'est-à-dire qu'il est la somme des produits des divers éléments $d\omega$ qui composent la section de rupture par le carré de la distance variable v de chaque élément à la ligne des fibres invariables;

n distance de la ligne des fibres invariables au point de la section d'encastrement qui en est le plus éloigné. La ligne des fibres invariables passant par le centre de gravité de la section, il sera toujours facile de déterminer la valeur de n (*Int.*, 1080).

La flèche est donnée par la formule

$$\frac{PL^3}{3} = EIf. \qquad (2)$$

E module ou coefficient d'élasticité (211 et 213);
EI *moment d'élasticité* de la pièce;
f flèche produite ou quantité dont s'abaisse le point d'application P dans la direction de cette force.

Comme, pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on a

$$n = \frac{h}{2},$$

et que le moment d'inertie est

$$I = \frac{bh^3}{12},$$

les deux formules fondamentales (1) et (2) deviennent, en remplaçant n et I par leurs valeurs,

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}, \qquad (1')$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Ebh^3}; \qquad (2')$$

b largeur de la section transversale de la pièce, ou dimension de cette section perpendiculaire à la direction de la force P;
h hauteur de la pièce, ou dimension de la section transversale parallèle à la direction de la force P.

Le membre $\frac{Rbh^2}{6}$ de l'équation (1') étant connu pour une pièce de section rectangulaire donnée, on en conclura la valeur de P ou celle de L, l'une ou l'autre de ces quantités étant connue. Si les valeurs de P et L étaient déterminées d'avance, de cette même équation on tirerait celles de b et h, en établissant entre b et h un rapport convenable à la pratique. Pour les pièces de fonte sans nervure on fait $b = \frac{1}{12} h$ au minimum, $b = \frac{1}{4} h$ au maximum et $b = \frac{1}{8} h$ en moyenne. Pour le bois, on fait varier b entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$ de h, et même, pour les pièces isolées, il convient de faire $b = \frac{5}{7} h$.

P étant exprimé en kilogrammes, et les quantités L, b, h *et* f *en mètres, on a pour* E *et* R *les valeurs du tableau suivant; les premières valeurs de* R *sont les moyennes des cas ordinaires de la pratique, et les secondes supposent des matériaux de choix et des constructions plus légères.*

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	VALEUR DE E.	VALEUR DE R qu'on ne doit pas dépasser en pratique.
Chêne.	1 200 000 000	550 000 à 750 000
Sapin jaune ou blanc.	1 300 000 000	600 000 à 800 000
Arcs en planches.	500 000 000	250 000 à 300 000
Fer doux forgé.	20 000 000 000	6 000 000 à 10 000 000
Fer laminé en barres et tubes en tôle.	12 000 000 000	4 700 000 à 7 800 000
Acier d'Allemagne.	21 000 000 000	12 500 000 à 16 600 000
Acier fondu..	30 000 000 000	16 600 000 à 22 000 000
Fonte grise à grain fin.	12 000 000 000	7 500 000 à 10 000 000
Fonte grise ordinaire, anglaise. . . .	9 000 000 000	5 600 000 à 7 500 000

Application. Quelles doivent être les valeurs de h et b, d'une pièce de sapin encastrée par une extrémité, pour $P=500$ kilog. et $L=1^m,50$, en négligeant le poids de la pièce?

Faisant $b=\frac{5}{7}h$ et remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (1'), on a

$$500\times 1{,}5=\frac{600000\times 5\times h^3}{7\times 6},\ \text{d'où}\ h=\sqrt[3]{\frac{500\times 1{,}5\times 7\times 6}{600000\times 5}}=0^m{,}219,$$

et par suite

$$b=\frac{5}{7}\times 0{,}219=0^m{,}156,$$

on a

$$f=\frac{4\times 500\times (1{,}5)^3}{1\,300\,000\,000\times 0{,}156\times (0{,}219)^3}=0^m{,}0051.$$

Valeur de* I *pour une pièce d'un profil quelconque. Chacune des deux parties séparées par la ligne des fibres invariables donne pour une pièce rectangulaire

$$I=\frac{bh^3}{24}.$$

Supposant la ligne des fibres invariables d'une résistance indéfinie, effet que produit chaque partie de la pièce par rapport à l'autre, on pourra supprimer l'une des parties, et on aura $h=\frac{h}{2}$ et par suite

$$I=\frac{bh^3}{3}.$$

Cela établi, pour un profil quelconque, on déterminera son centre de gravité, soit par les moyens connus, soit par la formule de Simpson

(Int. 987), on mènera par ce centre de gravité la ligne figurant les fibres invariables, on divisera la longueur de cette ligne en un nombre pair m de parties égales, et par les points de division on mènera des perpendiculaires à cette ligne ; m ayant été pris assez grand pour que l'on puisse considérer les profils compris entre les perpendiculaires comme rectangulaires, chaque profil élémentaire, au-dessus ou au-dessous de la ligne des fibres invariables, se trouvera dans les conditions de la dernière formule, et pour l'ensemble des profils élémentaires compris d'un même côté de la ligne des fibres invariables la formule de Simpson donnera, h_0, h_1, $h_2 \ldots h_m$ étant les plus grandes hauteurs des profils élémentaires,

$$I = \frac{b}{3 \times 3m} \left(h^3_0 + h^3_m + 4(h^3_1 + h^3_3 + \ldots + h^3_{m-1}) + 2(h^3_2 + h^3_4 + \ldots + h^3_m)\right).$$

Pour la partie de profil située de l'autre côté de la ligne des fibres invariables on calculera I par la même formule, dans laquelle il n'y aura que les valeurs de h_0, $h_1 \ldots$ de changées ; ajoutant ces deux valeurs trouvées, on aura celle de I pour tout le profil.

Si la section transversale du solide est un carré dont le côté est q, on a, dans le cas où il est fléchi dans le sens d'un côté,

$$n = \frac{q}{2}, \quad \text{et} \quad I = \frac{q^4}{12};$$

les formules (1) et (2) deviennent alors

$$PL = \frac{Rq^3}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Eq^4}{12} f, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Eq^4}.$$

Fig. 39.

Si la coupe transversale du solide prismatique encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par la force P *a la forme indiquée fig.* 39, on a

$$n = \frac{h}{2}; \quad \text{et} \quad I = \frac{bh^3 - b'h'^3}{12},$$

et les formules (1) et (2) deviennent

$$PL = \frac{R(bh^3 - b'h'^3)}{6h},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{E(bh^3 - b'h'^3)f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{E(bh^3 - b'h'^3)}.$$

Comme le font voir ces formules, ce solide est considéré comme étant la différence de deux autres.

Fig. 40.

Si le solide, au lieu d'être évidé au milieu, l'était latéralement, comme l'indique la *fig.* 40, on aurait encore

$$n=\frac{h}{2} \quad \text{et} \quad I=\frac{bh^3-b'h'^3}{12},$$

et par suite

$$PL=\frac{R(bh^3-b'h'^3)}{6h},$$

et

$$\frac{PL^3}{3}=\frac{E(bh^3-b'h'^3)f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f=\frac{4PL^3}{E(bh^3-b'h'^3)}.$$

Fig. 41.

La section transversale ayant la forme d'un T, comme l'indique la *fig.* 41, on a

$$n=\frac{1}{2}\times\frac{bh'^2-b'h'^2+b'h^2}{bh'-b'h'+b'h},$$

$$I=\frac{1}{3}\left[bn^3-(b-b')(n-h')^3+b'(h-n)^3\right],$$

$$PL=\frac{R}{3}\times\frac{bn^3-(b-b')(n-h')^3+b'(h-n)^3}{h-n},$$

$$\frac{PL^3}{3}=EIf, \quad \text{d'où} \quad f=\frac{PL^3}{E[bn^3-(b-b')(n-h')^3+b'(h-n)^3]}.$$

Fig. 42.

La section du solide étant un parallélogramme dont la diagonale b *est perpendiculaire à la direction de la force* P, *fig.* 42, on a

$$n=h \quad \text{et} \quad I=\frac{bh^3}{6};$$

les formules (1) et (2) deviennent

$$PL=\frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{3}=\frac{Ebh^3f}{6}, \quad \text{d'où} \quad f=\frac{2PL^3}{Ebh^3}.$$

Si la section était un carré ayant q *pour côté*, on aurait $b=\frac{2q}{\sqrt{2}}$ et $h=\frac{q}{\sqrt{2}}$, et ces valeurs substituées dans les formules précédentes donneraient

$$PL = \frac{Rq^3}{6\sqrt{2}},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Eq^4 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Eq^4}.$$

La flèche est la même que si la pièce était fléchie dans le sens des côtés de la section (voir ce cas, page 265).

Fig. 43.

Si la section est un losange ABCD (*fig.* 43), les formules sont les mêmes que pour le parallélogramme (*fig.* 42).

Pour une section triangulaire ABD, moitié du losange (*fig.* 43), on aurait, b étant toujours égal à AC, et h à $\frac{BD}{2}$.

$$PL = \frac{Rbh^2}{12},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Ebh^3}.$$

Ce qui fait voir que les valeurs de PL et f sont respectivement moitié et double de celles données par le losange entier,

Lorsque la section d'un solide est un triangle ABC (*fig.* 43), et que la ligne d'inertie ou des fibres invariables MN est parallèle à l'un des côtés, on a

$$n = \frac{2}{3}h \quad \text{et} \quad I = \frac{1}{36}bh^3;$$

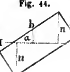
d'où l'on conclut, en substituant ces valeurs dans les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{Rbh^2}{24},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3 f}{36}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{12PL^3}{Ebh^3}.$$

Fig. 44.



La section du solide étant un rectangle disposé de manière que la ligne d'inertie MN *fasse avec le côté* b *un angle* α (*fig.* 44), on a (*Int.*, 841):

$$n = \frac{1}{2}(b \sin\alpha + h\cos\alpha) \quad \text{et} \quad I = \frac{Rbh}{12}(b^2 \sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha);$$

d'où l'on conclut, pour les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{Rbh}{6} \times \frac{b^2 \sin^2\alpha + h^2 \cos^2\alpha}{b \sin\alpha + h \cos\alpha},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebhf}{12}(b^2 \sin^2\alpha + h^2 \cos^2\alpha), \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Ebh(b^2 \sin^2\alpha + h^2 \cos^2\alpha)}.$$

Si $\alpha = 0$, on a $\sin\alpha = 0$, $\cos\alpha = 1$, et par suite

$$PL = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Ebh^3};$$

valeurs déjà trouvées, page 263, pour la section rectangulaire, quand la pièce est fléchie dans le sens des côtés de cette section.

La section du solide étant un cercle de rayon r, on a

$$n = r \quad \text{et} \quad I = \frac{\pi r^4}{4};$$

ce qui donne, pour les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{R\pi r^3}{4},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{\pi E r^4 f}{4}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E r^4}.$$

De ce qui précède, il résulte que le moment de résistance du carré est à celui du cercle inscrit dans le rapport de 1 à $\frac{3\pi}{16}$.

Si le solide est un cylindre creux, r étant son rayon extérieur et r' son rayon intérieur, on a

$$n = r \quad \text{et} \quad I = \frac{\pi}{4}(r^4 - r'^4)$$

d'où l'on conclut, pour les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{R\pi(r^4 - r'^4)}{4r},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{\pi E f}{4}(r^4 - r'^4), \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E(r^4 - r'^4)}.$$

Pour $r'=mr$, il vient

$$PL=\frac{R\pi}{4}r^3(1-m^4),\quad \text{et}\quad f=\frac{4PL^3}{3\pi Er^4(1-m^4)}.$$

En faisant $r'=0$ ou $m=0$ dans ces formules, on obtiendrait celles données pour le cylindre plein.

Pour un solide à section elliptique dont $2h$ est l'axe vertical et $2b$ l'axe horizontal (*Int.*, 869), on a

$$n=h\quad \text{et}\quad I=\frac{\pi}{4}bh^3,$$

et les formules (1) et (2) deviennent

$$PL=\frac{R\pi bh^2}{4},$$

et

$$\frac{PL^3}{3}=\frac{\pi Ebh^3f}{4},\quad \text{d'où}\quad f=\frac{4PL^3}{3\pi Ebh^3}.$$

Pour $b=h$, on rentrerait dans les formules relatives à la section circulaire.

Pour un solide creux à section elliptique, $2h$ et $2b$ étant les axes de l'ellipse extérieure, et $2h'$ et $2b'$ ceux de l'ellipse intérieure (*fig.* 45), on a

Fig. 45.

$$n=h\quad \text{et}\quad I=\frac{\pi}{4}(bh^3-b'h'^3),$$

et les formules (1) et (2) deviennent

$$PL=\frac{R\pi(bh^3-b'h'^3)}{4h},$$

et

$$\frac{PL^3}{3}=\frac{\pi Ef}{4}(bh^3-b'h'^3),\quad \text{d'où}\quad f=\frac{4PL^3}{3\pi Ef(bh^3-b'h'^3)}.$$

Si les ellipses intérieure et extérieure sont semblables, c'est-à-dire si on a $b'=mb$ et $h'=mh$, les formules précédentes donnent

$$PL=\frac{R\pi}{4}bh^2(1-m^4),\quad \text{et}\quad f=\frac{4PL^3}{3\pi Efbh^3(1-m^4)}.$$

Pour $b'=h'=0$, c'est-à-dire pour $m=0$, les formules précédentes deviennent celles posées pour la section elliptique pleine, et pour $b=h$ et $b'=h'$, elles fournissent les formules relatives aux sections circulaires, ce qui devait évidemment arriver.

216. *Si la pièce repose sur un appui placé en un des points de sa longueur, et qu'elle soit sollicitée à ses extrémités par deux forces qui se*

font équilibre autour de ce point d'appui, on a, pour une pièce prismatique à section rectangulaire,

$$\frac{pm+qn}{2}=\frac{Rbh^2}{6}. \qquad (\text{n}^\circ\ 215,\ \text{page } 263.)$$

m bras de levier de la force p qui sollicite une des extrémités de la pièce;
n bras de levier de la force q qui sollicite l'autre extrémité de la pièce;
$m+n=L$ longueur de la pièce;
$p+q=P$ charge totale que supporte la pièce.

Si le point d'appui est au milieu de la longueur de la pièce, on a $m=n=\frac{L}{2}$, par suite, $p=q=\frac{P}{2}$, et la formule précédente devient

$$\frac{PL}{4}=\frac{Rbh^2}{6}.$$

Pour les autres sections de pièce, il suffirait de remplacer PL par $\frac{pm+qn}{4}$ ou par $\frac{PL}{4}$ dans les formules du numéro précédent

217. *La charge sollicitant une pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités, au lieu d'être appliquée à l'extrémité de la pièce, peut être répartie uniformément sur toute sa longueur.* Dans ce cas, les deux formules fondamentales (1) et (2) du n° 215 deviennent

$$pL\times\frac{L}{2}=\frac{RI}{n} \quad \text{ou} \quad \frac{pL^2}{2}=\frac{RI}{n}, \qquad (1)$$

et

$$\frac{1}{8}\,pL\times L^3=EIf \quad \text{ou} \quad \frac{pL^4}{8}=EIf. \qquad (2)$$

Les lettres L, R, I, n, E et f ont les mêmes significations qu'au n° 215;
p charge par mètre de longueur de la pièce; c'est, par exemple, le poids de chaque mètre de longueur de la pièce;
pL charge totale;
$\frac{L}{2}$ bras de levier de la résultante du poids total pL.

En comparant la formule précédente (1) avec la formule analogue (1) du n° 215, on voit qu'une même pièce peut supporter une charge totale pL, répartie uniformément sur toute sa longueur, double de la charge P qu'elle supporte quand P est appliquée à l'extrémité de sa longueur, et en comparant la formule précédente (2) avec la formule analogue (2) du n° 215, on voit qu'une même pièce donne, pour une même charge, une flèche f qui n'est, pour le cas où la charge est uniformément répartie, que les 3/8 de celle produite par la même charge appliquée à l'extrémité de la pièce; ce qui revient à dire que pour produire une

même flèche, la charge uniformément répartie doit être au poids unique appliqué à l'extrémité de la pièce dans le rapport de 8 à 3.

En remplaçant, dans les formules (1) et (2), n et I par les différentes valeurs qui conviennent aux formes des sections transversales des pièces, on obtiendra des formules semblables à celles du n° 215; ainsi, pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on aura

$$\frac{pL^2}{2}=\frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{pL^4}{8}=\frac{Ebh^3f}{12},\quad \text{d'où}\quad f=\frac{3pL^4}{2Ebh^3}.$$

Pour les données de l'application de la page 264, c'est-à-dire pour $L=1^m,50$ et $pL=500$ kilog., remplaçant les lettres par leurs valeurs dans les formules précédentes, on tire $h=0^m,174$, $b=0^m,124$ et $f=0^m,0031$.

218. *La pièce peut être chargée d'un poids* P *appliqué à son extrémité, et d'un poids* pL *réparti uniformément sur toute sa longueur.* (Ce cas se présente particulièrement toutes les fois, qu'outre le poids P, on est obligé de tenir compte du poids de la pièce prismatique). Dans ce cas, les formules (1) et (2) des nos 215 et 217 deviennent, en conservant aux mêmes lettres les mêmes significations,

$$PL+\frac{pL^2}{2}=\frac{RI}{n}\quad \text{ou}\quad \left(P+\frac{pL}{2}\right)L=\frac{RI}{n},\qquad (1)$$

et

$$\frac{PL^3}{3}+\frac{pL^4}{8}=EIf\quad \text{ou}\quad \left(\frac{P}{3}+\frac{pL}{8}\right)L^3=EIf.\qquad (2)$$

En remplaçant n et I par les valeurs qui conviennent aux sections des pièces, on obtient des formules semblables à celles des nos 215 et 217; ainsi, pour une pièce à section rectangulaire, on a

$$\left(P+\frac{pL}{2}\right)L=\frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\left(\frac{P}{3}+\frac{pL}{8}\right)L^3=\frac{Ebh^3f}{12},\quad \text{d'où}\quad f=\frac{12\left(\frac{P}{3}+\frac{pL}{8}\right)L^3}{Ebh^3}.$$

219. *Pièce reposant sur deux appuis placés à ses extrémités.* Supposons d'abord que l'on puisse négliger le poids de la pièce, et qu'elle soit chargée d'un poids P placé au milieu de sa longueur. Dans ce cas, la pièce travaillant comme si elle était encastrée au milieu de sa longueur et sollicitée à chacune de ses extrémités par une force égale à $\frac{P}{2}$,

toutes les formules posées au n° 215 se reproduiront; seulement P sera remplacé par $\frac{P}{2}$ et L par $\frac{L}{2}$; ainsi, pour une pièce prismatique, les deux formules fondamentales (1) et (2) deviendront, en conservant aux lettres les mêmes significations,

$$\frac{PL}{4}=\frac{RI}{n}, \qquad (1)$$

et

$$\frac{PL^3}{48}=EIf. \qquad (2)$$

Comparant ces formules avec celles (1) et (2) obtenues n° 215, on voit qu'une même pièce supporte, dans le cas où elle repose sur deux appuis, une charge quatre fois plus grande que quand elle est seulement encastrée par une extrémité et chargée à l'autre, et que, pour un même poids, la flèche est seize fois plus petite.

Remplaçant n et I par les valeurs qui conviennent aux sections transversales des pièces, on obtiendra des formules semblables à celles posées au n° 215; ainsi, pour une pièce à section rectangulaire, on a

$$\frac{PL}{4}=\frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{48}=\frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f=\frac{PL^3}{4Ebh^3}.$$

220. *Si la charge est uniformément répartie sur toute la longueur de la pièce*, p étant la charge par mètre de longueur, la charge totale est pL, dont la moitié est $\frac{pL}{2}$, et les formules fondamentales (1) et (2) (219) deviennent

$$\frac{pL^2}{8}=\frac{RI}{n}, \qquad (1)$$

et

$$\frac{1}{48}\times\frac{5}{8}pL^4=EIf, \quad \text{d'où} \quad f=\frac{5pL^4}{384EI}. \qquad (2)$$

Ces formules font voir que le poids pL est double de celui supporté par la même pièce chargée en son milieu, et que la flèche est les 5/8 de celle produite par le même poids appliqué au milieu de la longueur de la pièce.

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on a, en remplaçant n et I par les valeurs qui conviennent à cette section (215),

$$\frac{pL^2}{8}=\frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{1}{48}\times\frac{5}{8}pL^4=\frac{Ebh^3f}{12},\quad \text{d'où}\quad f=\frac{\frac{5}{8}pL^4}{4Ebh^3}=\frac{5pL^4}{32Ebh^3}.$$

221. ***Si la pièce était chargée d'un poids* P *au milieu de sa longueur, et d'un poids* p *par mètre réparti uniformément sur sa longueur*,** on aurait (219 et 220),

$$\frac{PL}{4}+\frac{pL^2}{8}\quad \text{ou}\quad \left(P+\frac{pL}{2}\right)\frac{L}{4}=\frac{RI}{n}, \qquad (1)$$

et

$$\frac{PL^3}{48}+\frac{1}{48}\times\frac{5}{8}pL^4\quad \text{ou}\quad \left(P+\frac{5}{8}pL\right)\frac{L^3}{48}=EIf. \qquad (2)$$

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire on a donc, en remplaçant n et I par leurs valeurs (215),

$$\left(P+\frac{pL}{2}\right)\frac{L}{4}=\frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\left(P+\frac{5}{8}pL\right)\frac{L^3}{48}=\frac{Ebh^3f}{12},\quad \text{d'où}\quad f=\frac{\left(P+\frac{5}{8}pL\right)L^3}{4Ebh^3}.$$

222. ***La pièce reposant toujours sur deux appuis*,** il peut arriver que le poids unique P qu'elle supporte soit placé en un point quelconque de sa longueur. On a alors

$$\frac{Pll'}{L}=\frac{RI}{n}. \qquad (1)$$

l et l' distances du point d'application de P aux appuis, $l+l'=L$.

Pour une pièce à section rectangulaire, on a, en remplaçant n et I par leurs valeurs (215),

$$\frac{Pll'}{L}=\frac{Rbh^2}{6}.$$

Si le poids était appliqué au milieu de L, on aurait $l=l'=\frac{L}{2}$, et cette valeur, substituée dans ces deux dernières formules, reproduirait les formules déjà trouvées pour ce cas au n° 219.

La pièce étant chargée, en outre du poids P placé en un point quelconque de sa longueur, d'un poids p par mètre réparti uniformément, on a

$$\left(P+\frac{pL}{2}\right)\frac{ll'}{L}=\frac{RI}{n}. \qquad (1)$$

Pour une pièce à section rectangulaire, cette formule devient, en remplaçant n et I par leurs valeurs (215),

$$\left(P+\frac{pL}{2}\right)\frac{ll'}{L}=\frac{Rbh^2}{6}.$$

Pour $l=l'=\frac{L}{2}$, c'est-à-dire pour le cas où P est placé au milieu de la longueur de la pièce, ces deux formules fournissent celles trouvées pour cette manière d'être chargée de la pièce (221).

225. *Pièce prismatique dont une extrémité est encastrée, tandis que l'autre repose librement sur un appui.* Représentons par :

- P un poids placé en un point quelconque de la pièce;
- p une charge par mètre répartie uniformément sur la longueur de la pièce;
- L la longueur de la pièce;
- l et l' les distances respectives du point d'application du poids P au point d'encastrement et au point d'appui;
- q la pression exercée par la pièce sur le point d'appui.

Pour un point quelconque pris sur l, on a, en désignant par x sa distance au point d'encastrement, et en supposant que la section de la pièce est rectangulaire (215),

$$\frac{RI}{n}=\frac{Rbh^2}{6}=P(l-x)+\frac{p}{2}(L-x)^2-q(L-x). \qquad (a)$$

Si le point est pris sur l', et à une distance x' du point d'encastrement, le moment de rupture est, en supposant la pièce à section rectangulaire,

$$\frac{RI}{n}=\frac{Rbh^2}{6}=\frac{p}{2}(L-x')^2-q(L-x').$$

On a

$$q=\frac{3pL}{8}+\frac{Pl^2}{2L^3}(3L-l).$$

Suivant que P ou p sera nul, la valeur de q se réduira respectivement au premier ou au deuxième terme du second membre de cette équation ; ainsi, supposant P=0, on a

$$q=\frac{3pL}{8},$$

et la formule (a) devient

$$\frac{RI}{n}=\frac{Rbh^2}{6}=\frac{p}{2}(L-x)^2-\frac{3pL}{8}(L-x)=\frac{p}{2}(L-x)\left(\frac{L}{4}-x\right). \qquad (b)$$

Ce qui fait voir que pour les points qui donnent $x=\text{L}$ et $x=\frac{\text{L}}{4}$, le moment de rupture est nul; ainsi, pour le point qui repose sur l'appui et pour celui situé à la distance $x=\frac{\text{L}}{4}$ du point d'encastrement, la charge p pourrait être infinie; ce dernier point est celui d'inflexion de la pièce : c'est le point analogue au point M (fig. 46, n° 224).

Le point de plus grande flexion, c'est-à-dire le point où la flèche est la plus grande, est à une distance $x=\frac{5}{8}\text{L}$ du point d'encastrement. Cette valeur de x, substituée dans la formule (b), donne

$$\frac{\text{RI}}{n}=\frac{\text{R}bh^2}{6}=\frac{9}{128}p\text{L}^2.$$

La formule (b) fait voir aussi que le moment de résistance est d'autant plus grand que x est plus petit, et que pour $x=0$, c'est-à-dire pour le point d'encastrement, on a

$$\frac{\text{RI}}{n}=\frac{\text{R}bh^2}{6}=\frac{p\text{L}^2}{8}=\frac{16}{128}p\text{L}^2.$$

Cette valeur de $\frac{\text{RI}}{n}$, comparée à la précédente, fait voir qu'une pièce prismatique fatigue plus au point d'encastrement qu'au point même de plus grande flèche.

Cette plus grande flèche est donnée par la formule

$$\text{EI}f=0{,}0067p\text{L}^4,\quad \text{d'où}\quad f=\frac{0{,}0067p\text{L}^4}{\text{EI}}.$$

224. ***Pièce prismatique encastrée par ses deux extrémités.*** Soit, *fig.* 46 :

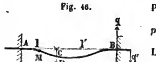


Fig. 46.

- P un poids placé en un point quelconque C de la pièce;
- p une charge par mètre répartie uniformément sur toute la longueur de la pièce;
- $\text{L}=l+l'$ la longueur de la pièce entre les encastrements;
- l et l' les distances respectives du point C aux points d'encastrement A et B;
- q et q' les forces verticales capables de produire le même effet que l'encastrement, c'est-à-dire de maintenir horizontal l'élément B de la pièce;
- d la distance de l'encastrement A à l'extrémité opposée de la pièce;
- x la distance horizontale d'un point quelconque de la partie AC au point A;
- x' la distance horizontale d'un point quelconque de CB au point A.

On a, pour un point pris sur AC,

$$\frac{\text{RI}}{n}=\text{P}(l-x)+\frac{p}{2}(\text{L}-x)^2-q(\text{L}-x)+q'(d-x). \qquad (a)$$

Si le point est pris sur CB, on a

$$\frac{\mathrm{RI}}{n}=\frac{p}{2}(\mathrm{L}-x')^2-q(\mathrm{L}-x')+q'(d-x').$$

Pour une pièce rectangulaire en x, on a $\frac{\mathrm{RI}}{n}=\frac{\mathrm{R}bh^2}{6}$ (215).

Lorsque $x=x'=l$, les deux valeurs précédentes du moment d'inertie deviennent égales; ce qui devait être, puisqu'alors x et x' se rapportent au même point C de la pièce.

On a

$$\frac{q\mathrm{L}^2}{2}-q'\mathrm{L}\left(d-\frac{\mathrm{L}}{2}\right)=\frac{p\mathrm{L}^3}{6}+\frac{\mathrm{P}l^2}{2}, \qquad (b)$$

et

$$\frac{q\mathrm{L}^3}{3}+\frac{q'\mathrm{L}^2}{2}\left(d-\frac{\mathrm{L}}{3}\right)=\frac{p\mathrm{L}^4}{8}+\frac{\mathrm{P}l^2}{2}\left(\mathrm{L}-\frac{l}{3}\right). \qquad (c)$$

Ces deux équations serviront à déterminer q et q'; ainsi de la première on tirera la valeur de q en fonction de q'; on substituera cette valeur dans la deuxième, qui donnera la valeur numérique de q', et cette valeur numérique étant substituée dans la première équation, qui ne renfermera plus que l'inconnue q, on pourra tirer la valeur de cette inconnue (*Int.*, 405).

Dans le cas où p est nul, la formule (a) devient

$$\frac{\mathrm{RI}}{n}=\mathrm{P}l-q\mathrm{L}+q'd-(\mathrm{P}-q+q')x.$$

Cette équation du premier degré en x fait voir que le point de plus grande fatigue de la pièce est celui pour lequel x a la plus grande valeur l ou la plus petite 0; c'est donc C ou A, points pour lesquels les valeurs respectives S et S' de $\frac{\mathrm{RI}}{n}$ deviennent

$$\mathrm{S}=q'd-q\mathrm{L}+(q-q')l \quad \text{et} \quad \mathrm{S}'=\mathrm{P}l-q\mathrm{L}+q'd.$$

Faisant $p=0$ dans les équations (b) et (c), on en conclut

$$q=\frac{\mathrm{P}l^2(3\mathrm{L}d-2\mathrm{L}^2+l\mathrm{L}-2ld)}{\mathrm{L}^3(d-\mathrm{L})} \quad \text{et} \quad q'=\frac{\mathrm{P}l^2(\mathrm{L}-l)}{\mathrm{L}^2(d-\mathrm{L})}.$$

Les moments S et S' deviennent, en remplaçant q et q' par ces valeurs,

$$\mathrm{S}=-\frac{2\mathrm{P}l^2(\mathrm{L}-l)^2}{\mathrm{L}^3} \quad \text{et} \quad \mathrm{S}'=\frac{\mathrm{P}l(\mathrm{L}-l)^2}{\mathrm{L}^2}.$$

Faisant les calculs, on verra quelle sera la plus grande de ces valeurs, et ce sera pour elle qu'il faudra prendre les dimensions de la pièce. Pour avoir les moments de la partie CB, il suffit de remplacer l par l' dans les équations précédentes.

Si le poids P *est placé au milieu de la longueur de la pièce*, c'est-à-dire si $l = \frac{L}{2}$, on a

$$S = S' = \frac{RI}{n} = \frac{PL}{8},$$

Ce qui fait voir que la charge que peut supporter la pièce est double de celle qu'elle supporte quand elle repose simplement sur deux appuis (219).

La flèche est donnée par la formule

$$EIf = \frac{PL^3}{192}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{PL^3}{192EI} \quad (215).$$

Ce qui fait voir que la flèche est quatre fois plus petite que quand la pièce repose simplement sur deux appuis (219).

Pour le point d'inflexion M, on a $x = \frac{L}{4}$.

Si $P = 0$, *et que la pièce soit uniformément chargée d'un poids* p *par mètre de longueur*, des deux équations (*b*) et (*c*) on conclut

$$q = \frac{1}{12}\frac{pL}{d-L}(6d - 5L), \quad \text{et} \quad q' = \frac{1}{12}\frac{pL^2}{d-L}.$$

Ces valeurs, substituées dans la formule (*a*), où on suppose également $P = 0$, donnent

$$\frac{RI}{n} = \frac{1}{12}p(L^2 - 6Lx + 6x^2) = \frac{p}{2}\left[\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 - \frac{L^2}{12}\right].$$

Ce qui fait voir que la valeur maxima du moment de résistance correspond à $x = 0$, c'est-à-dire au point A, pour lequel on a par conséquent

$$\frac{RI}{n} = \frac{pL^2}{12}.$$

On voit aussi que ce moment diminue à mesure que x augmente, et qu'il est égal à 0 quand

$$\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 = \frac{L^2}{12}, \quad \text{c'est-à-dire quand} \quad x = 0{,}212L.$$

A partir de $x = 0{,}212L$, le moment de résistance devient négatif et sa valeur absolue croît jusqu'au milieu de la pièce, pour lequel $x = \frac{L}{2}$, et par suite

$$\frac{RI}{n} = \frac{pL^2}{24}.$$

Tout étant symétrique par rapport au milieu de la pièce, au delà de ce point, le moment de rupture repasse par les mêmes valeurs.

La flèche est donnée par la formule

$$\mathrm{EI}f = \frac{1}{48} \times \frac{1}{8}\, p\mathrm{L}^4, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{p\mathrm{L}^4}{384\mathrm{EI}}.$$

Ainsi la flèche n'est que le 1/5 de celle qui a lieu, pour le même poids, quand la pièce repose librement sur deux appuis (220).

Dans les constructions, les poutres n'étant en général prises dans les murs que de 0m,30 à 0m,50 au plus, cela ne suffit pas pour produire un encastrement complet, et il est prudent de supposer que les pièces reposent sur deux appuis (219).

225. *Remarques.* **1re.** Dans les limites de charge où l'élasticité n'est pas altérée, et qui sont celles que supposent les formules précédentes, qu'il convient d'adopter dans la pratique, la fonte et le fer résistant également à l'extension et à la compression (211 et 213), il en résulte que pour les poutres à simple T il est indifférent de placer la nervure horizontale en dessus ou en dessous. Pour la rupture, la nervure se place en dessus ou en dessous, suivant que la résistance de la matière à la rupture est plus grande ou plus petite pour l'extension que pour la compression (page 266).

Par les mêmes raisons, dans les poutres à double T, les nervures doivent être les mêmes dans les limites de la pratique. Cependant, eu égard à ce que la fonte résiste bien mieux à la rupture par compression que par traction, les ingénieurs anglais, dans les poutres de pont, donnent à la nervure inférieure une étendue beaucoup plus grande qu'à la nervure supérieure.

2e. Il est prudent de ne faire travailler les poutres en fonte soumises à des vibrations, comme celles des ponts de chemin de fer, qu'au 1/5 et même au 1/6 de la charge de rupture. Pour les ponts ordinaires, on les fait travailler au 1/4. La résistance moyenne de la fonte à la rupture par flexion étant 32 441 000 kil., on fera dans les formules précédentes R égal au 1/5, ou au 1/6, ou au 1/4 de ce nombre, selon les cas.

3e. On admet que la flexion des poutres en fonte ne doit pas dépasser 1/600 de la portée, et qu'il conviendrait de la limiter à 1/2000.

4e. Les ingénieurs anglais pensent que la charge d'un pont varie de 5 000 à 6 655 kil. par mètre de longueur de paire de rails. La charge d'épreuve excède rarement le 1/5 de celle de rupture, et on préfère souvent n'aller qu'à la charge réelle maximum, en observant les flexions.

5e. Des expériences de M. Fairbairn, il résulte que les flexions sont encore proportionnelles aux charges pour les poutres en fer à double T, et que le coefficient d'élasticité est E = 11 502 000 000.

6e. Des expériences du même expérimentateur sur des tubes en tôle ont donné E = 16 600 000 000 jusqu'à une flexion de 1/378 de la portée.

Le premier grand tube en tôle du pont de Conway a donné $E = 13\,185\,000\,000$. Les ingénieurs anglais admettent que la résistance de la tôle à la rupture est, par mètre carré, $28\,680\,000^k$ pour la traction, et $23\,290\,000^k$ pour la compression, nombres qui sont sensiblement dans le rapport de 5 à 4. Dans la pratique, on peut supposer ces deux résistances égales et faire $R = 6\,000\,000$ kil.

226. *Formules pratiques relatives aux tourillons.* Des expériences de Buchanan, il résulte que le diamètre d'un tourillon en fonte est, pour résister à la flexion, donné par la formule

$$d = k \sqrt[3]{P},$$

et celui des tourillons en fer par celle

$$d = k \sqrt[3]{\frac{9}{14} P} = 0{,}863\, k \sqrt[3]{P}.$$

d diamètre du tourillon, en centimètres;

k coefficient variable de 0.87 à 0.95 d'après les observations de Buchanan, et de 0.71 à 0.85 d'après celles de Tredgold. On pourra considérer la valeur maxima de Buchanan comme convenable aux tourillons soumis à des réactions brusques, comme ceux des arbres à cames; on pourra la réduire à 0.85 pour les roues hydrauliques. Dans les machines à vapeur, on peut faire, d'après Robertson, $k = 0.69$, en augmentant de 1/8 pour l'usé, et encore cette règle donne des diamètres trop forts pour les machines d'une puissance supérieure à 20 chevaux.

P charge du tourillon ou pression qu'il exerce sur son coussinet, exprimée en kilogrammes.

Ces deux formules font voir que la résistance à la flexion d'un tourillon en fonte est à celle d'un tourillon en fer de même diamètre dans le rapport de 9 à 14; ainsi, faisant $k = 0.80$ pour la fonte, le diamètre d'un tourillon en fer placé dans les mêmes conditions sera donné par la formule

$$d = 0.80 \times 0.863 \sqrt[3]{P} = 0.69 \sqrt[3]{P}.$$

La longueur convenable des tourillons est, d'après Tredgold, égale à 1,2 fois le diamètre; ce sont en effet les proportions généralement adoptées en pratique, à l'exception des tourillons en fer dont le diamètre est inférieur à $0^m,07$, pour lesquels la longueur se prend le plus souvent égale à 1,5 fois le diamètre.

227. *Solides d'égale résistance.* Quand une pièce est encastrée par une extrémité et chargée à l'autre d'un poids P, le moment de cette force P, pour rompre la pièce en un point quelconque, est d'autant plus petit que ce point est plus éloigné de l'encastrement; de là il résulte que pour ne pas employer de matière inutile les sections transversales de la pièce doivent aller en diminuant depuis l'encastrement jusqu'au point d'application du poids, point où la section devient nulle.

La formule $PL = \frac{Rbh^2}{6}$, donnée pour une pièce rectangulaire (215), est applicable à un point quelconque de la longueur de la pièce ; alors, supposant que la hauteur h reste constante, et résolvant l'équation par rapport à b, on aura, pour une valeur quelconque l de L,

$$b = \frac{6P}{Rh^2}\, l.$$

Fig. 47.

Ce qui fait voir que la largeur du solide sera proportionnelle à l ; ainsi le solide étant représenté en élévation par le rectangle ABCD (*fig.* 47), dont la dimension $AB = h$, il le sera en plan par le triangle EFG.

Supposant au contraire que la largeur b reste constante, et résolvant l'équation par rapport à h, on aura, pour une valeur quelconque l de L,

$$h^2 = \frac{6P}{Rb}\, l,$$

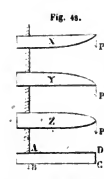


Fig. 48.

C'est-à-dire que le carré de la hauteur h sera proportionnel à l, et la pièce qui est représentée en plan par le rectangle ABCD (*fig.* 48), dont la dimension $AB = b$, le sera en élévation par l'une quelconque des trois formes paraboliques X, Y, Z, dont le sommet est au point d'application de la force P (*Int.*, 927).

On peut, en opérant d'une manière analogue, déterminer la forme des solides d'égale résistance, pour toutes les manières dont peuvent reposer les solides et quelle que soit la manière dont ils sont chargés.

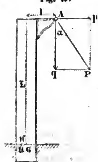


Fig. 49.

228. *Pièce soumise à une force* P *appliquée en un point quelconque* A *de la pièce, et faisant avec la direction de cette pièce un angle* α. La force P se décompose en deux, l'une $P \sin \alpha = p$ normale à la direction de la pièce, et l'autre $P \cos \alpha = q$ dirigée suivant la direction de la pièce.

La direction de la force q ne passant pas au centre de gravité G de la section de rupture, la ligne des fibres invariables se trouvera au point H différent de G, et en appelant :

n la distance du point le plus éloigné de la section de rupture de la pièce à la ligne des fibres invariables, quand la pièce est seulement sollicitée par la force p; cette ligne passe alors par le point G (215);
n' la distance HG;
S la section de la pièce;
R le plus grand effort auquel peut être soumise la matière qui compose la pièce (215);
I le moment d'inertie de la section transversale de la pièce (215);
L la longueur de la pièce ou le bras de levier de la force p;
l le bras de levier de la force q;
E le coefficient d'élasticité (215);
f la flèche produite;

On a

$$n' = \frac{ql}{(pL+ql)S}.$$

On a aussi

$$\frac{R}{n+n'}\,I = pL + ql;$$

d'où on conclut, en remplaçant n' par sa valeur précédente,

$$\frac{RI}{n} = pL + ql + \frac{ql}{nS}.$$

Si la section de la pièce est rectangulaire, on a (215)

$$n = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad I = \frac{bh^3}{12},$$

et, par suite, en remarquant que $S = bh$,

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = pL + ql + \frac{qh}{6}.$$

Formule à l'aide de laquelle on déterminera la charge que pourra supporter une pièce de dimensions déterminées, ou ces dimensions pour supporter une charge donnée.

Dans le cas où $q = 0$, la formule précédente devient

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = pL,$$

ce que l'on devait trouver, puisqu'alors la pièce n'est plus soumise qu'à un effort p normal à sa longueur (215). Si au contraire on a $p = 0$, et que la pièce soit seulement chargée d'un poids q, on a

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = q\left(l + \frac{h}{6}\right).$$

Dans les formules précédentes, on a négligé la flèche produite; ce que l'on peut faire en pratique; quoiqu'il faudrait, pour plus d'exactitude, l'ajouter à l.

On a, en négligeant f par rappor à l,

$$f=\frac{L^2}{EI}\left(\frac{pL}{3}+\frac{ql}{2}\right)=\frac{12L^2}{Ebh^3}\left(\frac{pL}{3}+\frac{ql}{2}\right).$$

Si $q=0$, on a

$$f=\frac{pL^3}{3EI}=\frac{4pL^3}{Ebh^3}\qquad\text{(comme au n° 215).}$$

Si au contraire $p=0$, on a

$$f=\frac{qlL^2}{2EI}=\frac{6qlL^2}{Ebh^3}.$$

229. *Aiguille verticale supportant une charge de liquide* (*fig.* 50). Appelant :

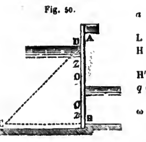


Fig. 50.

- a l'étendue horizontale de liquide dont la pression se reporte contre l'aiguille ;
- L la distance AB des appuis de l'aiguille ;
- H la profondeur de l'eau en amont, au-dessus du point B ;
- H' la profondeur de l'eau en aval ;
- q et q' les pressions de l'aiguille sur les points A et B ;
- ω la densité du liquide ou le poids du cube de liquide dont le côté a servi à exprimer les longueurs a, L, H, H'.

La pression du liquide sur la face d'amont de l'aiguille est représentée par la surface du triangle rectangle isocèle BCD multipliée par a et par la densité du liquide ; ainsi elle est

$$\omega\times a\times\frac{H^2}{2}.$$

Sur la face d'aval de l'aiguille la pression de l'eau est

$$\omega\times a\times\frac{H'^2}{2}.$$

Les centres de pression sont situés à des hauteurs $\frac{H}{3}$ et $\frac{H'}{3}$ au-dessus du point B (*Int.*, 1282).

La somme des pressions de l'aiguille contre ses appuis est la différence des expressions précédentes, c'est-à-dire

$$\frac{\omega a}{2}(H^2-H'^2).$$

Prenant par rapport au point fixe B les moments des forces qui sollicitent l'aiguille, puisqu'il y a équilibre, on doit avoir

$$qL = \omega a\left(\frac{H^2}{2}\times\frac{H}{3}-\frac{H'^2}{2}\times\frac{H'}{3}\right),\quad \text{d'où}\quad q=\frac{\omega a}{6L}(H^3-H'^3).$$

On a alors

$$q' = \frac{\omega a}{2}(H^2-H'^2)-\frac{\omega a}{6L}(H^3-H'^3).$$

Pour un point O situé au-dessus du niveau d'aval et à la profondeur z au-dessous du niveau d'amont, on a (215).

$$\frac{RI}{n} = q\,[L-(H-z)]-\frac{\omega a z^3}{6}. \qquad (a)$$

Le point de plus grande courbure de l'aiguille, au-dessus du niveau d'aval, correspond à

$$z=\sqrt{\frac{2q}{\omega a}}=\sqrt{\frac{H^3-H'^3}{3L}}.$$

Remplaçant z par cette valeur et q par la sienne dans l'équation (a), on a pour le point de plus grande fatigue de la partie considérée, en réduisant,

$$\frac{RI}{n}=\frac{\omega a}{6L}(H^3-H'^3)\left(L-H+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{H^3-H'^3}{3L}}\right). \qquad (c)$$

Pour un point O' situé au-dessous du niveau d'aval à la hauteur z' au-dessus du point B, on a, en remarquant que $H-H'$ est la hauteur constante de pression sur tous les points situés au-dessous de ce niveau,

$$\frac{RI}{n}=q'z'-(H-H')\frac{\omega a z'^2}{2}. \qquad (b)$$

Le point de plus grande fatigue de l'aiguille, au-dessous du niveau d'aval, correspond à

$$z'=\frac{q'}{\omega a(H-H')}=\frac{H+H'}{2}-\frac{H^3-H'^3}{6L(H-H')}.$$

Remplaçant z' par cette valeur et q' par la sienne dans l'équation (b), il vient pour le point de plus grande fatigue, en réduisant,

$$\frac{RI}{n}=\frac{\omega a}{2}(H-H')\left(\frac{H+H'}{2}-\frac{H^3-H'^3}{6L(H-H')}\right)^2. \qquad (d)$$

Le moment de résistance $\frac{RI}{n}$ ou $\frac{Rbh^2}{6}$, si l'aiguille est un prisme à section rectangulaire (213), devra donc être au moins égal à la plus grande des valeurs (c) et (d).

230. *Résistance à la torsion.* Lorsqu'une pièce prismatique homogène

est soumise à un effort de torsion, tant qu'on n'a pas dépassé la limite d'élasticité, le rapport de cet effort à l'angle de torsion est à peu près constant pour une même matière. Désignant par G ce rapport, par Q l'effort, et par θ l'angle de torsion, pour une tige ayant l'unité de longueur et l'unité de section, on a $\frac{Q}{\theta} = G$, que l'on peut appeler coefficient de torsion.

Pour un solide cylindrique ou prismatique, on a

$$PR = \frac{Gt}{L} I, \text{ d'où } t = \frac{PR \times L}{GI}. \qquad (a)$$

P force tendant à tordre le corps en agissant dans un plan normal à l'axe ;
R bras de levier de P, ou longueur de la perpendiculaire commune à la direction de P et à l'axe du corps ;
PR moment de la force P ;
t angle de torsion, ou longueur de l'arc décrit par un point situé à l'unité de distance de l'axe du corps, ou encore longueur de l'arc décrit par un point quelconque du corps, divisée par la distance de ce point à l'axe ;
L Longueur de la pièce ;
$I = \int n^2 d\omega^2$ somme des produits de la surface $d\omega$ de la section de chacune des fibres élémentaires qui composent la pièce par le carré de la distance n de cette fibre à l'axe. I a été appelé *moment d'inertie polaire* par M. Persy.

Pour une section circulaire. . . . . $I = \frac{\pi r^4}{2}$.

Pour une section en couronne circulaire. . $I = \frac{\pi(r^4 - r'^4)}{2}$.

Pour une section rectangulaire. . . . . . . $I = \frac{b^3 h^3}{3(b^2 + h^2)}$.

Pour une section carrée $q = b = h$ et $I = \frac{q^4}{6}$.

r rayon du cylindre plein ;
r et r' rayons extérieur et intérieur du cylindre creux ;
b et h côtés de la section de la pièce prismatique ;
q côté de la pièce à section carrée.

Des expériences de M. Duleau, de M. Favard et de la société industrielle de Mulhouse, et de plusieurs observations, M. Morin conclut le tableau suivant des valeurs de G :

Fer doux.	6 000 000 000
Fer en barres.	6 666 000 000
Acier d'Allemagne.	6 000 000 000
Acier fondu, très-fin.	10 000 000 000
Fonte.	2 000 000 000
Cuivre.	4 366 000 000
Bronze.	1 066 000 000
Chêne.	400 000 000
Sapin.	433 000 000

Dans la pratique, il convient de limiter assez l'angle de torsion pour qu'il ne nuise pas à la transmission de mouvement et que l'élasticité de la fibre la plus éloignée de l'axe ne soit pas altérée. Or cette fibre formant une hélice dont la tangente forme avec la position primitive de la fibre un angle dont la tangente trigonométrique est $\frac{n't}{L}$, c'est cette tangente qu'il suffit de limiter.

n' distance de l'axe à la fibre qui en est la plus éloignée.

Des expériences et observations citées ci-dessus, il résulte que l'on peut faire pour les arbres allégés

$$\frac{n't}{L} = 0{,}000667.$$

Tangente qui correspond à un angle de 2′ 18″ formé par les deux positions de la fibre.

Pour les arbres forts ou premiers moteurs on fait

$$\frac{n't}{L} = \frac{0{,}000\,667}{2} = 0{,}000333.$$

On a donc en moyenne

$$\frac{n't}{L} = 0{,}0005 \quad \text{d'où} \quad t = 0{,}0005\,\frac{L}{n'}.$$

Comme pour les arbres cylindriques pleins, cylindriques creux, à section rectangulaire et à section carrée, on a respectivement

$$n' = r, \quad n' = r, \quad n' = \frac{1}{2}\sqrt{b^2 + h^2}, \quad n' = \frac{q}{\sqrt{2}}.$$

On a donc pour ces sections respectives

$$t = 0{,}0005\,\frac{L}{r} \quad t = 0{,}0005\,\frac{L}{r} \quad t = 0{,}0005\,\frac{2L}{\sqrt{b^2+h^2}} \quad t = 0{,}0005\,\frac{L\sqrt{2}}{q}.$$

Remplaçant dans la première des formules (a) t et I par leurs valeurs, on a pour les sections précédentes les formules pratiques

$$PR = 0{,}0005\,G\,\frac{\pi r^3}{2} \quad PR = 0{,}0005\,G\,\frac{\pi(r^4 - r'^4)}{2r}$$

$$PR = 0{,}0005\,G\,\frac{bh(b^2+h^2)}{6\sqrt{b^2+h^2}} \quad PR = 0{,}0005\,G\,\frac{q^3}{3\sqrt{2}}.$$

Ces dernières formules servent à calculer quelles doivent être les dimensions de la section transversale de l'arbre pour résister à un mo-

ment donné PR, et elles font voir que ce moment est indépendant de la longueur L de la pièce, ce qui est évidemment vrai jusqu'au moment de rupture. Les expressions de t font voir au contraire que l'angle de torsion est proportionnel à L et au moment PR.

Des expériences de M. Carillon sur des fontes de Paris et de différentes localités françaises, il résulte que la valeur 0,000 667 de $\frac{v't}{L}$ n'est que le 1/16 environ de celle qui correspond à la rupture; ce qui indique que la formule pratique conduit à des dimensions que l'on peut considérer comme supérieures à celles nécessaires.

Formule pratique. On peut encore se servir, pour déterminer le diamètre à donner aux pièces cylindriques soumises à un effort de torsion, de la formule

$$d^3 = k\,\frac{A}{n}.$$

k coefficient dont la valeur dépend de la nature de la pièce;
d diamètre de la pièce en centimètres;
A quantité d'action transmise par la pièce en une minute, exprimée en kilogrammètres;
n nombre de tours que fait la pièce en une minute.

Pour un arbre creux, la quantité d'action A qu'il peut transmettre est égale à celle que pourrait transmettre l'arbre s'il était plein, moins celle que pourrait transmettre un arbre plein d'un diamètre égal au diamètre intérieur de l'arbre creux; d'où il résulte qu'en appelant d le diamètre extérieur de l'arbre creux, et d' son diamètre intérieur, on a

$$d^3 - d'^3 = k\,\frac{A}{n}.$$

D'après Buchanan, $k = 2.3$ pour les arbres ou tourillons en fonte, et $k = \frac{9}{14}\,2.3 = 1.48$ pour les arbres ou tourillons en fer. Mais, à mesure que les moyens de fabrication se sont perfectionnés, les dimensions des différentes pièces de machines ont dû diminuer, et, d'après les observations de M. Walter, sur 21 machines construites depuis peu, et dont les arbres ou tourillons en fonte transmettent des effets variant de 5 à 50 chevaux, avec des vitesses de rotation très-variables, mais sans choc, il résulte que pour la fonte k varie de 1,10 au minimum à 1,86 au maximum, et que la valeur moyenne de k est sensiblement 1,6. La valeur 1,10 a été trouvée pour des arbres en bonne fonte anglaise faisant marcher des moulins à blé; mais il convient de ne pas faire k plus petit que 1,25. Quand le travail transmis est irrégulier, mais sans chocs ou avec des chocs très-faibles, on pourra considérer la valeur 1,86 de k comme donnant toute la sécurité désirable.

A l'usine de Terre-Noire, pour le tourillon en fonte d'une machine de 35 chevaux commandant un marteau frontal, $k=5{,}085$; l'arbre fait 20 tours par minute, et il fonctionne depuis 1823.

Au Creuzot, pour une machine analogue, $k=7{,}66$.

En admettant le rapport de la résistance du fer à celle de la fonte de Buchanan, la valeur moyenne de k pour la fonte étant 1,6, pour le fer on aura $k=\frac{9}{14}\,1{,}6=1{,}03$; mais, quoique cette valeur soit encore quelquefois dépassée en pratique, il convient de la considérer comme valeur maxima, et ne devant être employée que pour le fer de médiocre qualité et non corroyé; c'est ce qui résulte du tableau suivant, dû aux observations de M. Walter.

DÉSIGNATION DES MACHINES.	FORCE transmise par chaque tourillon	NOMBRE de tours par minute.	DIAMÈTRE des tourillons.	VALEUR de k.
	chevaux.		m.	
Machine du bateau le Sphinx.	30	25	0.16	0.758
Id. le Montereau.. . .	10	30	0.1125	0.944
Id. la Ville de Corbell.	10	30	0.11	0.887
Id. la Ville de Nantes.	12	50	0.105	1.070
Roue hydraul. marchant depuis 1833. .	4	10	0.09	0.405
Roue hydraulique commandant une machine à couper le chiffon.	6	8	0.135	0.729
Roue hydraulique de Guérigny.	30	9	0.22	0.709

La roue hydraulique qui donne $k=0{,}405$ commande une machine à papier, et produit par conséquent un travail régulier. Les autres valeurs de k correspondent à des travaux irréguliers, et en partie par chocs; ainsi la roue de Guérigny, commandant des laminoirs, agit par chocs, atténués il est vrai par un volant, et pour les bateaux, les réactions quelquefois très-violentes de l'eau se reportent directement sur les tourillons. On peut donc, suivant que le travail transmis par l'arbre a plus ou moins d'analogie avec celui des machines du tableau, considérer les valeurs 0,405, 0,709 et 0,758 de k comme suffisantes.

Lorsqu'un arbre n'est soumis qu'à un effort de torsion, il suffit que son diamètre soit égal à celui du tourillon; mais dans la pratique il convient de le prendre de 1/10 à 1/8 plus grand.

Pour le bois, M. Faure rapporte :

1° Que des arbres à 8 pans, de roues hydrauliques, transmettant un effort régulier sans choc, et marchant depuis longtemps sans éprouver de torsion sensible, lui ont donné pour k les valeurs 17, 19 et 25, dont la moyenne est 20 environ.

2° Que des arbres de transmission de mouvement à des laminoirs,

également à 8 pans, lui ont donné $k = 50$ en moyenne, et même l'un de ces arbres, se tordant un peu il est vrai lors de l'engagement des barres de fer, mais n'en résistant pas moins, a donné $k = 42$.

3° Que des arbres ronds de $0^m,80$ à $0^m,83$ de diamètre, formés de 4 pièces de bois, bien cerclés en fer et entourés de bagues en fonte; mais commandant des marteaux, et étant par conséquent soumis à des chocs violents, ont donné $k = 160$; valeur que l'on ne doit pas considérer comme trop grande, puisque l'on remarque encore une légère torsion. Un arbre de $0^m,71$ de diamètre, donnant $k = 95$, valeur minima trouvée, se tordait et se fendillait sous les efforts qu'il avait à supporter. La longueur des arbres de marteaux observés a varié de 6 à 8 mètres.

231. *Arbre soumis à la fois à un effort de flexion et de torsion.* Dans ce cas, on calcule le diamètre de l'arbre pour résister à chacun des efforts séparément (219 et 230), et on prend celle des deux valeurs trouvées qui est la plus grande. Si le plus grand diamètre est donné par l'effort de torsion, on prend le diamètre trouvé pour les tourillons, et on augmente de 1/10 à 1/8 celui de l'arbre.

232. *Dimensions des balanciers.* On peut considérer un balancier comme un solide reposant sur un appui placé au milieu de sa longueur et chargé à ses deux extrémités (216); on obtiendra donc ses dimensions, en négligeant les nervures, que l'on ne considère que comme une garantie de solidité, au moyen de la formule

$$\frac{PL}{2} \times \frac{Rbh^2}{6}.$$

P force réelle qui sollicite chaque extrémité du balancier, en kilog.
L distance des points d'application des deux forces P;
R = 7000000 pour la fonte (215); mais il convient, dans ce cas de mouvement, de faire R égal au 1/6 de la résistance absolue, c'est-à-dire à 4670000;
b épaisseur du balancier, en mètres;
h hauteur du balancier au milieu de sa longueur, en mètres.

L'épaisseur b de la toile au *panneau*, non compris les nervures, est uniforme sur toute la longueur du balancier, et varie du 1/12 au 1/16 de la hauteur h; cependant, pour les bateaux, où on supprime les nervures, b est quelquefois égal au 1/6 et même au 1/5 de h.

La longueur L est ordinairement égale à trois fois la course du piston.

On donne au balancier la forme parabolique (227 et *Int.*, 939), et afin de pouvoir fixer les petits arbres qu'il porte à ses extrémités, on le termine par des manchons dont le rayon extérieur est égal au rayon intérieur multiplié par 5/2; ces manchons sont raccordés avec les arcs de parabole par des tangentes communes droites ou courbes. Au lieu de faire passer les arcs de parabole par les centres des manchons, comme l'indique la théorie, on les fait quelquefois passer par les points

extérieurs de ces manchons, c'est-à-dire par les points extrêmes du balancier. Souvent même on se contente de tracer des arcs de cercle tangents aux circonférences extérieures des deux manchons, et passant par les points extrêmes de la hauteur h.

La saillie des nervures varie des 2/3 de l'épaisseur b du balancier à une fois cette épaisseur.

La longueur totale des moyeux recevant les différents axes fixés au balancier varie de 1.5 à 2 fois le diamètre de ces axes. Ce diamètre est égal à 1,2 fois celui des tourillons, et celui ci se calcule par la formule du n° 217. La longueur du grand moyeu varie ordinairement entre les 2/5 et la 1/2 de h.

233. *Dimensions des manivelles* (84 et suivants). On peut considérer une manivelle comme un solide encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par une certaine force. On obtiendra donc ses dimensions, en négligeant les nervures, au moyen de la formule

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (215)$$

P force agissant à l'extrémité de la manivelle;
L longueur de la manivelle;
R = 7000000 (215), mais il convient, comme dans le numéro précédent, de faire R = 4670000 pour les manivelles en fonte;
b épaisseur de la manivelle, en mètres;
h hauteur de la manivelle au point d'encastrement, en mètres.

On donne à l'épaisseur b, qui est uniforme sur toute la longueur de la manivelle, de 1/6 à 1/5 de h; seulement on renforce b par une nervure qui joint les extrémités des manchons que porte la manivelle.

On donne à la manivelle la forme parabolique (227 et *Int.*, 939), et on raccorde les deux manchons aux arcs de parabole par des arcs de cercle tangents aux manchons et aux arcs de parabole. Le manchon qui reçoit l'arbre moteur a un rayon extérieur égal à 1,8 et jusqu'à 2,2 fois le rayon intérieur; le manchon qui reçoit le maneton a un rayon extérieur égal à 2 et jusqu'à 2,5 fois le rayon intérieur.

La longueur de ces manchons est ordinairement égale à 1,2 fois leur diamètre intérieur.

Le diamètre du maneton se calcule par la formule du n° 217, et celui de l'arbre moteur par celles du n° 230,

234. *Dents de roue d'engrenage* (80 et suivants). On peut considérer une dent d'engrenage comme un solide encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par un certain effort; ses dimensions seront donc données par la formule

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (215)$$

P pression que supporte la dent en kilogrammes; on suppose P égal à la pression totale d'une roue d'engrenage sur l'autre, et appliqué à l'extrémité de la dent, comme étant le cas le plus favorable à la rupture;

L longueur de la dent, c'est sa saillie sur la jante;

b largeur de la dent;

h hauteur ou épaisseur de la dent, suivant la circonférence de la roue;

R = 7000000 (215); mais les dents d'engrenage étant soumises à des chocs. Il résulte des observations de Tredgold qu'il convient de faire R=1500000 pour les dents en fonte.

Remplaçant R par sa valeur dans la formule précédente, on a

$$PL = 250000bh^2.$$

Cependant, pour des roues faites avec soin et transmettant un effort régulier, on peut poser

$$PL = 300\,000bh^2.$$

En pratique on fait $L = 1.2h$ pour les engrenages qui transmettent de grands efforts, et $L = 1.5h$ pour ceux qui ne transmettent que de faibles charges.

La valeur de b est comprise entre $6h$ et $3h$, suivant que P est plus ou moins grand; c'est ce que fait voir le tableau suivant:

Valeurs de P en kilog.	Valeurs relatives de b et h.
100 à 250	$b=3,0h$
250 à 500	$b=3,5h$
500 à 800	$b=4,0h$
800 à 1200	$b=5,0h$
1200 à 2000	$b=5,5h$
2000 à 3000	$b=6,0h$

Pour les dents en bois durs, tels que charme, racine de poirier, de sorbier..., on peut conserver entre L, b et h les mêmes relations que pour la fonte et poser

$$PL = 145000bh^2.$$

253. *Jante de roue d'engrenage.* Sa largeur est égale à celle de la dent, et l'expérience prouve que son épaisseur doit être égale à celle h de la dent; on la fait égale aux 2/3 de h quand on la renforce, comme on le fait souvent, par une nervure intérieure dont la saillie est à peu près égale à celle des dents.

Pour les roues soumises à des chocs, ou transmettant des efforts qui exigeraient des valeurs de h trop considérables, on renforce la jante par des joues qui emboîtent aussi les dents, de manière à ne laisser que 0^m 010 ou 0^m.012 de jeu entre les joues des deux roues engrenées; l'épaisseur de ces joues varie de 1/2 aux 2/3 de l'épaisseur h de la dent. L'écartement des deux joues d'une même roue se fait égal à la largeur b des dents de l'autre roue, plus un jeu de 0^m,006 à 0^m,008.

Pour les roues à dents de bois, la largeur totale de la jante est égale à la largeur b des dents, augmentée de part et d'autre de la dent d'une quantité égale aux 2/3 de l'épaisseur h de la dent. L'épaisseur de la jante se fait égale à h.

La queue de la dent a 4 à 6 millimètres de moins que la dent, dans le sens de la circonférence, et 8 à 10 parallèlement à l'axe. Ces queues font saillie de 0m.02 à 0m,025 à l'intérieur de la jante, où on les taille en queue d'aronde, de manière à pouvoir serrer les dents avec des coins.

236. *Bras de roue d'engrenage.* Pour des roues d'engrenage de 1m,30 de diamètre et au-dessous, il suffit de quatre bras; pour des diamètres de 1m,30 à 2m,50, on en emploie six; pour ceux de 2m,50 à 5m,00, huit, et pour ceux de 5m,00 à 7m,00, dix. Le nombre des bras ne dépend pas seulement du diamètre de la roue, mais aussi des proportions de la couronne, qui demande à être d'autant mieux soutenue, soit pour son coulage, soit pour son service, qu'elle est plus légère.

On peut encore, jusqu'à un certain point, considérer un bras comme un solide encastré par une extrémité et sollicité à l'autre par une certaine force; ainsi, en supposant que les nervures ne font que résister aux efforts latéraux, on peut poser

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (215)$$

P effort tangentiel à la roue, et que la formule suppose n'agir à la fois que sur un seul bras;
L longueur totale du bras mesurée depuis le moyeu;
b épaisseur du bras; elle varie ordinairement entre 1/4 et 1/5 de h;
h hauteur du bras près du moyeu; c'est sa dimension suivant la direction de l'effort qui tend à le rompre;
R = 7000000, comme pour une pièce encastrée par une extrémité (215); cela suppose que la résistance que le bras qui travaille reçoit des autres compense l'effet des vibrations.

L'épaisseur des nervures est environ les 2/3 de celle du bras, et l'une et l'autre sont uniformes sur toute la longueur du bras. Les arêtes du bras sont droites, et la hauteur h' près de la jante varie entre les 2/3 et les 3/4 de la hauteur h près du moyeu.

La largeur du bras, comptée sur les nervures, se fait à peu près égale à la hauteur h du corps du bras.

237. *Boulons et écrous.* M. Armengaud aîné, de la discussion des proportions adoptées par divers constructeurs et ingénieurs, a formé le tableau suivant pour les vis et boulons à filets triangulaires. La dernière colonne donne les tractions longitudinales que l'on fait supporter aux boulons (*Publication industrielle*).

DIAMÈTRE extérieur.	DIAMÈTRE au fond des filets.	PROFONDEUR des filets	PAS.	DIAMÈTRE exterieur de l'écrou a 6 pans.	HAUTEUR de l'écrou.	HAUTEUR de la tête du boulon.	TRACTION longitudinale.
mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	kilog.
5	3.2	0.8	1.4	13.7	5	6	20
7.5	5.5	1.0	1.6	17	7.5	7.5	45
10	7.7	1.1	1.8	22	10	9.5	81
12.5	9.9	1.3	2.0	26	12.5	11	126
15	12.2	1.4	2.2	30	15	13	182
17.5	14.5	1.5	2.4	35	17.5	14.5	248
20	16.7	1.6	2.6	38	20	16.5	324
22.5	19.1	1.7	2.8	42	22.5	18	410
25	21.2	1.9	3.0	46	25	20	506
30	25.7	2.1	3.4	54	30	23.5	729
35	30.2	2.4	3.8	62	35	27	992
40	34.7	2.6	4.2	70	40	30 5	1296
45	39.2	2.9	4.6	78	45	34	1640
50	43.7	3.2	5.0	86	50	37.5	2025
55	48.0	3.5	5.4	94	55	41	2450
60	52.4	3.8	5.8	102	60	44.5	2916
65	56 8	4.1	6.2	110	65	48	3422
70	61.1	4.4	6.6	118	70	51.5	3969
75	65.5	4.7	7.0	126	75	55	4556
80	69.9	5.0	7.4	134	80	58.5	5184

Le même auteur indique les dimensions suivantes pour les vis et boulons à filets carrés

DIAMÈTRE exterieur.	PROFONDEUR des filets.	PAS.	ÉPAISSEUR des filets.	HAUTEUR de l'écrou.	TRACTION longitudinale.
mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	kilog.
20	1.80	3.80	1.90	45.6	324
25	2.02	4.25	2.12	51.0	506
30	2.23	4.70	2.35	56.4	729
35	2.45	5.15	2.57	61.8	992
40	2.66	5.60	2.80	67.2	1296
45	2.87	6 05	3.02	72.6	1640
50	3.19	6.50	3.25	78.0	2025
55	3.30	6.95	3.47	83.4	2450
60	3.51	7.40	3.70	88.8	2916
65	3.73	7.85	3.92	94.2	3422
70	3.94	8.30	4.15	99.6	3969
75	4.16	8.75	4.37	105.0	4556
80	4.37	9.20	4.60	110.4	5184
85	4.58	9.65	4.82	115.8	5852
90	4.80	10.10	5.05	121.2	6561
95	5.01	10.55	5.27	126.6	7300
100	5.22	11.00	5.50	132.0	8100
105	5.44	11.45	5.72	137.4	8930
110	5.65	11.90	5.95	142.8	0801
115	5.87	12.35	6.17	148.2	10712
120	0.08	12 80	6.40	153.6	11664

Rosettes. Les rosettes placées sous la tête des boulons sont percées d'un trou carré, et celles placées sous les écrous le sont d'un trou rond.

	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.
Diamètre	108	84	58	48	34	26
Épaisseur	7	6	4	3	1	1
Largeur du chanfrein au vif	12	10	6	4	»	»
Trous des rosettes. Équarrissage	30	26	20	10	»	»
Trous des rosettes. Diamètre	28	24	19	15	11	9

258. *Vis à bois.* Tête fraisée avec une bordure mince (212).

	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.
Longueur totale, tête comprise	60	46	25	25	20
Longueur de la partie filetée	35	30	17	17	13
Diamètre de la tête	17	15	12	10	8.5
Diamètre de la tige sous la tête	9	8	7	6	4.5
Diamètre de la tige au bout	8	7	0	5	4
Épaisseur de la tête	5	4	4	3	2.

259. *Classification des fils de fer selon la jauge de Limoges.*

NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.	NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.	NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.	NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.
0	0.39	7	1.12	13	1.91	19	3.95
1	0 45	8	1.24	14	2.02	20	4.50
2	0.56	9	1.35	15	2 14	21	5.10
3	0.67	10	1.46	16	2.25	22	5.65
4	0.79	11	1.68	17	2.84	23	0.20
5	0.90	12	1.80	18	3.40	24	6.80
6	1.01						

240. *Tôles.* Les tôles fortes employées à la construction des chaudières à vapeur proviennent de fer de fonte au bois, affiné au bois. Les feuilles ont de 1 à 3 mètres de longueur sur $0^m,325$ à $1^m,30$ de largeur, et leur épaisseur varie de millimètre en millimètre depuis 4 jusqu'à 15.

Les tôles de fer de fonte au bois, affiné à la houille, sont employées à la confection des tuyaux de poêles, des cheminées, des toitures, etc.

241. *Fer-blanc.* La tôle est en fer de fonte au bois, affiné au bois. Les feuilles, laminées à l'épaisseur convenable, sont décapées, étamées, lavées et polies. Elles s'expédient en caisses de 100, 150, 200 et 225 feuilles, dont les dimensions et poids sont les suivants :

NOMBRE de feuilles.	DIMENSION DES FEUILLES.		POIDS bruts des caisses.
	Longueur.	Largeur.	
	m.	m.	kilog.
100	0.435	0.325	48 à 69
100	0.490	0.350	73 à 85
150	0.405	0.310	78 à 103
150	0.325	0.265	28 à 53
200	0.380	0.270	57 à 87
225	0.350	0.260	58 à 88

242. *Classification des fers*, d'après M. Flachat.

DÉNOMINATION.	LARGEUR.	ÉPAISSEUR.	DIAMÈTRE	CÔTÉ.
	millim.	millim.	millim.	millim.
Fers marchands plats. . .	40 à 160	10 et au-dessus.	»	»
Id. méplats..	25 à 40	15 *id.*	»	»
Id. carrés. .	»	»	»	35 à 100
Fers de petite forge, plats.	25 à 40	8 à 9	»	»
Id. méplats..	25 à 30	9 à 11	»	»
Id. carrés. .	»	»	»	19 à 20
Martinets ronds.	»	»	10 à 100	»
Carillon.	»	»	»	10 à 20
Bandelettes..	15 à 40	5 à 7	»	»
Fenderie, verges	5 à 25	6 à 14	»	»
Aplatis pour carrosserie. .	40 à 70	0 et au-dessus.	»	»
Aplatis pour cuves.	25 à 100	3 à 8	»	»

DEUXIÈME PARTIE.

Chaleur appliquée aux arts industriels.

POUVOIRS DES CORPS POUR LA CHALEUR.

243. *Pouvoir émissif ou rayonnant.* Tous les corps, quelles que soient leur nature et leur température, jouissent de la propriété d'émettre ou de rayonner de la chaleur. Chaque rayon émané se meut en ligne droite, et son intensité en un point quelconque varie, pour une même source de chaleur, en raison inverse du quarré de la distance de ce point à la source. La quantité plus ou moins grande de chaleur émise ou rayonnée par un corps est ce que l'on appelle le *pouvoir émissif ou rayonnant* de ce corps

TABLEAU des valeurs relatives des pouvoirs émissifs ou rayonnants de quelques corps placés dans les mêmes circonstances de température et de milieu environnant.

DÉSIGNATION DES CORPS.	VALEURS relatives des pouvoirs émissifs ou rayonnants, d'après	
	Leslie.	M. Melloni.
Noir de fumée.	100	100
Eau.	100	»
Carbonate de plomb	»	100
Papier à écrire.	98	»
Ivoire, jais, marbre.	»	93 à 98
Colle de poisson.	»	91
Verre ordinaire.	90	»
Encre de Chine.	88	85
Glace.	85	»
Gomme laque.	»	72
Mercure.	20	»
Plomb brillant.	19	»
Fer poli.	15	»
Étain, argent, or.	12	»
Surface métallique	»	12

Le pouvoir émissif d'une surface métallique est d'autant plus petit que cette surface est mieux polie.

TABLEAU des pouvoirs émissifs ou rayonnants de quelques corps, d'après les expériences récentes de MM. de La Provostaye et Desains.

DÉSIGNATION DES CORPS.	POUVOIRS.
Noir de fumée	100
Platine sortant du laminoir	10.74
Platine bruni	9.09
Argent mat chimiquement déposé sur cuivre	5.37
Le même, bruni	2.10
Argent vierge sortant du laminoir	2.94
Le même, bruni	2.38
Le même, maintenu dix ou douze heures à 120°	2.77
Argent appliqué en feuilles minces sur l'argent ou sur le platine	2.04
Or appliqué en feuilles	4.25
Cuivre rouge en lames polies, disposées pour la gravure	4.76
Cuivre en feuilles appliqué sur du cuivre	5.55

Variations des pouvoirs émissifs avec l'inclinaison, d'après ces derniers expérimentateurs.

INCLINAISON.	NOIR DE FUMÉE déposé à la lampe.	VERRE.	CÉRUSE. à l'essence.	OCRE ROUGE à l'essence.	NOIR à l'essence.
0°	100	90.0	100	100	100
60	»	83.6	94.6	»	»
70	100	75.01	83.0	91.2	»
75	»	65.3	»	»	»
80	100	55.44	65.9	82.3	76

244. *Pouvoirs absorbant et réflecteur.* Lorsqu'un corps poli est rencontré par un rayon de chaleur, il en absorbe une partie et réfléchit l'autre. La portion plus ou moins grande de chaleur absorbée est ce qu'on appelle le *pouvoir absorbant* de ce corps, et la portion réfléchie est son pouvoir *réflecteur*.

On admet que le pouvoir absorbant d'un corps est égal à son pouvoir émissif, et qu'il est complément de son pouvoir réflecteur : ainsi le pouvoir émissif d'un corps étant 90, son pouvoir absorbant sera 90, et son pouvoir réflecteur 10 ; ces nombres supposent que la quantité totale de chaleur qui vient frapper le corps est représentée par 100.

TABLEAU des valeurs relatives des pouvoirs réflecteurs de quelques corps, d'après Leslie.

DÉSIGNATION DES CORPS.	VALEURS relatives des pouvoirs réflecteurs.
Cuivre jaune	100
Argent	90
Étain en feuille	85
Bloc d'étain plané	80
Acier	70
Plomb	60
Étain mouillé de mercure, avec surface brillante	50
Verre	10
Verre couvert d'une couche de cire ou d'huile	5
Noir de fumée	0

D'après M. Melloni, le pouvoir absorbant d'un corps varie bien dans le même sens que le pouvoir émissif; mais, de plus, il est variable, pour un même corps, suivant la nature de la source de chaleur.

TABLEAU des résultats obtenus par M. Melloni.

DÉSIGNATION DES CORPS.	POUVOIRS ABSORBANTS, LA SOURCE DE CHALEUR ÉTANT			
	une lampe.	du platine incandescent.	du cuivre à 400°.	du cuivre à 100°.
Noir de fumée	100	100	100	100
Carbonate de plomb	53	56	89	100
Colle de poisson	52	54	64	91
Encre de Chine	96	95	87	85
Gomme laque	43	47	70	72
Surface métallique	14	13,5	13	13

TABLEAU des pouvoirs réflecteurs de quelques métaux très-répandus, d'après MM. de La Provostaye et Desains.

DÉSIGNATION DES CORPS.	POUVOIRS.
Plaqué d'argent.	97
Acier doré poli.	97
Argent fondu ou battu, bien poli.	96 ou 97
Or plaqué.	95
Laiton fondu ou battu, poli vif.	93
Cuivre rouge.	93
Fer cuivré.	93
Cuivre argenté un peu laiteux.	91
Laiton battu, poli gras.	91
Cuivre rouge verni.	86
Métal des miroirs récemment poli.	85.5
Id. un peu altéré.	82.5
Platine en lame.	83
Platine chimiquement déposé sur cuivre.	83
Platine en couches 5 à 6 fois plus épaisses, poli médiocre.	76
Acier.	82.5
Zinc.	81
Fer.	77
Fonte.	74 ou 75
Mercure liquide.	environ 77

D'après ces expérimentateurs, les pouvoirs réflecteurs des métaux ne paraissent pas changer avec l'incidence pour des angles inférieurs à 70°; mais pour des angles supérieurs, ils diminuent sensiblement; ainsi pour les angles 75° ou 80° ils deviennent à peu près les 0,94 de ce qu'ils étaient sous des incidences plus petites. Il a été impossible d'observer avec sécurité dans des incidences plus rasantes, de sorte qu'on ne peut dire si la diminution continue jusqu'à 90°.

245. *Pouvoir conducteur des corps pour la chaleur.* Tous les corps ne conduisent pas également bien la chaleur; c'est ce que fait voir le tableau suivant des pouvoirs conducteurs relatifs de quelques corps, d'après M. Despretz.

DÉSIGNATION DES CORPS.	POUVOIRS relatifs.	DÉSIGNATION DES CORPS.	POUVOIRS relatifs.
Or.	1000.0	Zinc.	363.0
Platine.	981.0	Étain.	303.9
Argent.	973.0	Plomb.	179.5
Cuivre.	898.2	Marbre.	23.6
Laiton.	748.6	Porcelaine.	12.2
Fonte.	561.5	Terre cuite.	11.4
Fer.	374.3		

Lorsqu'un corps conduit bien la chaleur, il prend le nom de *bon conducteur de la chaleur;* si au contraire il la conduit mal, il prend le nom de *mauvais conducteur de la chaleur.*

Les corps composés de fibres très-fines, comme le coton, la laine, l'édredon, l'ouate, le son, la paille, le charbon très-divisé, sont les plus mauvais conducteurs de la chaleur. Les liquides et les gaz sont aussi des mauvais conducteurs de la chaleur; aussi, lorsqu'on veut les échauffer, faut-il avoir recours à l'échauffement par contact en produisant des courants dans ces matières; ce que du reste on obtient naturellement en plaçant le foyer sous les liquides ou les gaz à échauffer. Si l'on gène les mouvements des liquides ou des gaz au moyen de corps fibreux, l'échauffement est considérablement retardé.

ÉVALUATION DES TEMPÉRATURES.

246. *Thermomètres.* Ces instruments, fondés sur les variations de volume que font subir aux corps les variations de température, servent à apprécier l'état de chaleur dans lequel se trouvent les corps.

Dans le thermomètre centigrade, le nombre 0° de l'échelle correspond à la température constante de la glace fondante, et le nombre 100°, à la température, aussi constante, de l'ébullition de l'eau pure sous la pression atmosphérique $0^m,76$ de mercure. Chaque division du thermomètre représente un degré centigrade.

Dans le thermomètre de Réaumur, 0° correspond à la glace fondante, et 80° à l'eau bouillante.

Dans le thermomètre Farenheit, 32° correspond à la glace fondante, et 212° à l'ébullition de l'eau.

Les relations qui existent entre les températures indiquées par ces différents thermomètres sont :

$$C = \frac{5}{4} R, \quad C = \frac{5}{9}(F - 32) \quad \text{et} \quad R = \frac{4}{9}(F - 32).$$

C température en degrés centigrades;
R *id.* *id.* Réaumur;
F *id.* *id.* Farenheit.

De ces formules on conclut les résultats du tableau suivant :

NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés		NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés	
	Réaumur.	Farenheit.		Réaumur.	Farenheit.
	deg. cent.	deg. cent.		deg. cent.	deg. cent.
—28	—35.00	—33.33	+20	+25.00	— 6.67
27	33.75	32.78	21	26.25	6.11
26	32.50	32.22	22	27.50	5.56
25	31.25	31.67	23	28.75	5.00
24	30.00	31.11	24	30.00	4.45
23	28.75	30.56	25	31.25	3.90
22	27.50	30.00	26	32.50	3.34
21	26.25	29.45	27	33.75	2.78
20	25.00	28.89	28	35.00	2.23
19	23.75	28.34	29	36.25	1.67
18	22.50	27.78	30	37.50	1.11
17	21.25	27.23	31	38.75	0.56
16	20.00	20.67	32	40.00	0.00
15	18.75	26.12	33	41.25	+ 0.56
14	17.50	25.56	34	42.50	1.11
13	16.25	25.01	35	43.75	1.67
12	15.00	24.45	36	45.00	2.23
11	13.75	23.90	37	46.25	2.78
10	12.50	23.34	38	47.50	3.34
9	11.25	22.79	39	48.75	3.90
8	10.00	22.22	40	50.00	4.45
7	8.75	21.07	41	51.25	5.00
6	7.50	21.11	42	52.50	5.56
5	6.25	20.56	43	53.75	6.11
4	5.00	20.00	44	55.00	6.67
3	3.75	19.45	45	50.25	7.23
2	2.50	18.89	46	57.50	7.78
1	1.25	18.34	47	58.75	8.34
0	0.00	17.78	48	60.00	8.89
+ 1	+ 1.25	17.23	49	61.25	9.45
2	2.50	10.67	50	62.50	10.00
3	3.75	16.11	51	63.75	10.56
4	5.00	15.56	52	65.00	11.11
5	6.25	15.00	53	66.25	11.67
6	7.50	14.45	54	67.50	12.23
7	8.75	13.90	55	08.75	12.78
8	10.00	13.34	56	70.00	13.34
9	11.25	12.78	57	71.25	13.90
10	12.50	12.23	58	72.50	14.45
11	13.75	11.67	59	73.75	15.00
12	15.00	11.11	60	75.00	15.56
13	16.25	10.56	61	76.25	16.11
14	17.50	10.00	62	77.50	10.67
15	18.75	9.45	63	78.75	17.23
16	20.00	8.89	04	80.00	17.78
17	21.25	8.34	05	81.25	18.34
18	22.50	7.78	06	82.50	18.89
19	23.75	7.23	67	83.75	19.45

NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés		NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés	
	Reaumur.	Farenheit.		Réaumur.	Farenheit.
	deg. cent.	deg. cent.		deg. cent.	deg. cent.
+ 68	+ 85.00	+20.00	+115	+143.75	+40.11
09	80.25	20.56	110	145.00	40.67
70	87.50	21.11	117	146.25	47.23
71	88.75	21.67	118	147.50	47.78
72	90.00	22.23	119	148.75	48.34
73	91.25	22.78	120	150.00	48.90
74	92.50	23.34	121	151.25	49.45
75	93.75	23.90	122	152.50	50.00
70	95.00	24.45	123	153.75	50.50
77	96.25	25.00	124	155.00	51.11
78	97.50	25.56	125	156.25	51.67
79	98.75	20.12	120	157.50	52.23
80	100.00	26.67	127	158.75	52.78
81	101.25	27.23	128	160.00	53.34
82	102.50	27.78	129	161.25	53.90
83	103.75	28.34	130	162.50	54.45
84	105.00	28.89	131	163.75	55.00
85	106.25	29.45	132	105.00	55.56
86	107.50	30.00	133	160.25	50.11
87	108.75	30.56	134	167.50	56.67
88	110.00	31.11	135	108.75	57.23
89	111.25	31.07	130	170.00	57.78
90	112.50	32.22	137	171.25	58.34
91	113 75	32.78	138	172.50	58.90
92	115.00	33.33	139	173.75	59.45
93	116.25	33.89	140	175.00	60.00
94	117.50	34.45	141	176.25	60.50
95	118.75	35.00	142	177.50	01.11
90	120 00	35.50	143	178.75	61.67
97	121.25	30.11	144	180.00	62.23
98	122.50	36.67	145	181.25	02.78
99	123.75	37.23	146	182.50	03.34
100	125.00	37.78	147	183.75	03.90
101	120.25	38.34	148	185.00	04.45
102	127.50	38.90	149	186.25	65.00
103	128.75	39.45	150	187.50	05.56
104	120.00	40.00	151	188.75	66.11
105	131.25	40.56	152	190.00	66.07
106	132.50	41.11	153	191.25	07.23
107	133.75	41.67	154	192.50	07.78
108	135.00	42.23	155	193.75	68.34
109	130.25	42.78	150	195.00	68.90
110	137.50	43.34	157	190.25	69.45
111	138.75	43.00	158	197.50	70.00
112	140.00	44.45	159	198.75	70.56
113	141.25	45.00	160	200.00	71.11
114	142.50	45.56			

TEMPÉRATURES en degrés		TEMPÉRATURES en degrés		TEMPÉRATURES en degrés		TEMPÉRATURES en degrés	
Farenh.	centigrades.	Ferenh.	centigrades.	Farenh.	centigrades	Farenh.	centigrades.
+161	+ 71.67	+ 219	+ 103.90	+277	+136.11	+335	+168.34
162	72.23	220	104.45	278	136.67	336	108.90
163	72.70	221	105.00	270	137.23	337	169.45
164	73.34	222	105.56	280	137.78	338	170.00
165	73 90	223	106.11	281	138.34	339	179.56
166	74.45	224	106.67	282	138.90	340	171.11
167	75.00	225	107.23	283	139.45	341	171.67
168	75.50	226	107.78	284	140.00	342	172.23
160	76.11	227	108.34	285	149.56	343	172.78
170	76.67	228	108.90	286	141.11	344	173.34
171	77.23	229	109.45	287	141.67	345	173.90
172	77.78	230	110.00	288	142.23	346	174.45
173	78.34	231	110.56	289	142.78	347	175.00
174	78.90	232	111.11	290	143.34	348	175.56
175	79.45	233	111.07	291	143.90	349	176.11
176	89.00	234	112.23	292	144.45	350	176,67
177	80.56	235	112.78	293	145.00	351	177.23
178	81.11	236	113.34	204	145.50	352	177.78
179	81 67	237	113.00	295	146.11	353	178.34
180	82.23	238	114.45	296	146.67	354	178.90
181	82.78	239	115.00	297	147.23	355	179.45
182	83.34	240	115.56	298	147.78	356	180.00
183	83.90	241	116.11	299	148.34	357	180.56
184	84.45	242	116.67	300	148.90	358	181.11
185	85.00	243	117.23	301	149.45	359	181.67
180	85.50	244	117.78	302	150.00	360	182.23
187	80.11	245	118.34	303	150.56	361	182.78
188	86.67	246	118.00	304	151.11	362	183.34
189	87.23	247	119.45	305	151.07	363	183.00
190	87.78	248	120.00	306	152.23	304	184.45
191	88.34	249	120.56	307	152.78	365	185.00
192	88.90	250	121.11	308	153.34	366	185.56
193	89.45	251	121.67	309	153.90	367	186.11
194	90.00	252	122.23	310	154.45	368	186.67
195	90.56	253	122.78	311	155.00	369	187.23
196	91.11	254	123.34	312	155.56	370	187.78
197	91.67	255	123.90	313	150.11	371	188.34
198	92.23	256	124.45	314	156.67	372	188.90
190	92.78	257	125.00	315	157.23	373	180.45
200	93.34	258	125.56	316	157.78	374	190.00
201	93.90	259	126.11	317	158.34	375	100.56
202	94.45	260	126.67	318	158.90	376	191.11
203	95.00	261	127.23	319	159.45	377	191.67
204	95.56	262	127.78	320	160.00	378	102.23
205	96.11	263	128.34	321	160 65	379	192.78
206	90.07	264	128.90	322	161.11	380	193.34
207	97.23	265	120.45	323	161.67	381	193.00
208	97.78	260	130.00	324	162.23	382	194.45
209	98.34	267	130.50	325	162.78	383	105.00
210	98.00	268	131.11	326	163.34	384	105.56
211	99.45	269	131.07	327	163.90	385	106.11
212	100.00	270	132.23	328	104.45	386	196.67
213	100.56	271	132.78	329	165.90	387	197.23
214	101.11	272	133.34	330	165.56	388	197.78
215	101.67	273	133.90	331	166.11	389	198.34
216	102.23	274	134.45	332	166.67	300	198.90
217	102.78	275	135.00	333	167.23	391	199.45
218	103.34	276	135.56	334	167.78	392	290.00

247. Les *thermomètres à gaz* présentent sur le thermomètre à mercure, et en général sur les thermomètres formés par les substances solides et liquides, un avantage qui tient à la grandeur de la dilatation de la substance thermométrique. Dans un thermomètre quelconque, formé par une substance liquide ou gazeuse, les indications de l'instrument dépendent de la dilatation de cette substance et de celle de l'enveloppe. Or la dilatation du mercure n'est guère que sept fois celle du verre qui le renferme; les variations que l'on remarque dans la loi de dilatation des différentes espèces de verre forment donc des fractions très-sensibles des dilatations apparentes du mercure, et influent par suite d'une manière notable sur les indications de l'instrument. Dans le thermomètre à gaz, au contraire, la dilatation du gaz étant 160 fois celle du verre, les variations dans la loi de dilatation des diverses espèces de verre n'influent plus sensiblement sur les indications de l'appareil, et n'empêchent pas les instruments d'être comparables.

Le gaz d'un thermomètre peut se trouver dans des conditions telles, que la pression soit constante et que son volume varie, ou que son volume soit constant et que sa pression varie.

Fig. 51.

Dans le premier cas, fig. 51 :

Le thermomètre à gaz est composé d'un réservoir A, que l'on place dans l'enceinte dont on veut connaître la température; d'un tube calibré *df*, réuni au réservoir A par un tube capillaire *ab* qui l'éloigne de l'enceinte; d'un tube *cd*, ouvert à sa partie supérieure, et par lequel on introduit du mercure dans l'appareil; enfin d'un robinet *r*, établissant à volonté la communication : 1° entre le tube *df* et l'atmosphère; 2° entre le bas du tube *cd* et l'atmosphère; 3° entre les deux tubes *df*, *cd*; 4° simultanément entre les tubes *df*, *cd* et l'atmosphère. La plaque de fonte *i*, qui relie les tubes et le robinet, porte deux pattes qui servent à fixer l'appareil contre une cloison pendant l'expérience.

Le tube calibré *df* remplit les fonctions de la tige divisée du thermomètre à mercure, et sert à recueillir le gaz que l'élévation de la température chasse du réservoir A; ce tube est d'ailleurs maintenu à une température constante peu différente de celle de l'air ambiant. A un moment quelconque de l'expérience, le gaz renfermé dans l'appareil se compose de deux parties : la première, qui occupe le réservoir A, se trouve à la température x; la seconde, recueillie dans le tube *df*, se trouve à la température ambiante t. Ces deux portions de gaz supportent la même pression, que l'on peut d'ailleurs rendre aussi rapprochée que l'on veut de la pression atmosphérique à l'aide du robinet r; on établit la communication simultanée entre les deux tubes *df*, *cd*, et avec l'atmosphère, de manière à faire écouler le mercure jusqu'à ce qu'il ait pris le même niveau dans les deux tubes.

Appelant :

V le volume du réservoir A à la température 0° ;
k le coefficient de dilatation cubique moyen du réservoir A depuis 0° jusqu'à la température à évaluer x;
α le coefficient de dilatation du gaz, que l'on suppose constant;
v le volume que l'air occupe dans le tube gradué df à la température t, quand le réservoir A est placé dans la glace fondante;
v' le volume que l'air occupe dans df à la même température t quand le réservoir A est à la température x;
H la force élastique du gaz en millimètres; H sera égal à la pression atmosphérique si le mercure a le même niveau dans les deux tubes df, cd;
H' la force élastique du gaz quand le réservoir A est à la température x; à l'aide du robinet r, on pourra faire en sorte que H' diffère le moins possible de H;
δ la densité du gaz à 0° et sous la pression de 760 millimètres.

Suivant que le réservoir A est à la température 0° ou à la température x, le poids du gaz contenu dans l'appareil est exprimé par

$$\left(V+\frac{v}{1+\alpha t}\right)\delta\times\frac{H}{760} \quad \text{ou} \quad \left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x}+v'\frac{1}{1+\alpha t}\right)\delta\times\frac{H'}{760}.$$

Ces deux poids étant nécessairement égaux, on a donc

$$\left(V+\frac{v}{1+\alpha t}\right)\frac{H}{H'}=V\frac{1+kx}{1+\alpha x}+\frac{v'}{1+\alpha t}.$$

Équation qui permet de calculer x.

C'est cette disposition que M. Pouillet a employée comme pyromètre à air (Traité de Physique) (248); mais M. Regnault a cru devoir la rejeter pour thermomètre à air. Elle présente un inconvénient très-grave quand l'appareil est destiné à mesurer des températures élevées; dans ce cas, la plus grande partie de l'air se trouve dans le tube calibré df, et il n'en reste plus qu'une portion très-petite dans le réservoir A; de sorte que la partie qui sortira maintenant par une nouvelle élévation de température sera très-petite, et se mesurera difficilement dans le tube calibré avec une précision suffisante.

Si la température x s'élève de dx, le volume v' deviendra $v'+dv'$, et l'on déduit de l'équation précédente

$$\frac{1}{V}\times\frac{1}{1+\alpha t}\times\frac{dv'}{dx}=\alpha\frac{1+kx}{(1+\alpha x)^2}-k\frac{1}{1+\alpha x}.$$

Ainsi dv', qui représente la sensibilité de l'appareil, varie à peu près en raison inverse du carré de $1+\alpha x$.

M. Regnault, dans ses recherches, a fait usage du thermomètre à air, dans lequel le volume du gaz est maintenu constant. La température est évaluée à l'aide de l'augmentation de force élastique du gaz, due à la dilatation qu'il aurait subie par suite de son accroissement de température, et cela en admettant la loi de Mariotte sur la compression des gaz (256). Ce thermomètre est plus commode que celui à pression constante, et il donne plus de précision; de plus, il a l'avantage de présen-

ter autant de sensibilité dans les hautes températures que dans les basses.

Si l'on veut mesurer des températures très-élevées, par exemple, si l'appareil doit servir comme pyromètre à air (248), la force élastique du gaz intérieur devenant très-considérable, il est à craindre que l'enveloppe ne subisse une déformation permanente sous l'influence de cette grande pression intérieure. On remédie à cet inconvénient en introduisant dans l'appareil de l'air sous une pression initiale plus faible que celle de l'atmosphère, lorsque le réservoir est à 0°. On peut, de cette manière, maintenir les forces élastiques entre des limites aussi resserrées que l'on veut. Il est clair, d'ailleurs, que l'appareil devient d'autant moins sensible que la force élastique du gaz à 0° est plus faible; mais comme la mesure des forces élastiques se fait avec une précision extrême, les indications de l'appareil présenteront encore une exactitude suffisante dans le plus grand nombre de cas, lors même que la pression initiale du gaz à 0° ne sera que de 1/4 d'atmosphère.

Quoique la valeur absolue du coefficient de dilatation d'un gaz change très-notablement avec sa densité, il résulte des expériences faites par M. Regnault que des thermomètres à gaz, chargés avec des gaz de nature différente, marchent d'accord entre eux lorsqu'ils ont été réglés pour des points fixes de 0° et de 100°.

Fig. 52.

La figure 52 représente la disposition employée par M. Regnault pour son thermomètre à gaz.

L'appareil se compose de deux tubes en verre *df*, *cd*, de 12 à 14 millimètres de diamètre intérieur, mastiqués dans une pièce de fonte *t* à robinet *r*, comme pour le thermomètre fig. 51. Le tube *cd* est ouvert à sa partie supérieure, et celui *df* communique avec le ballon A par un tube capillaire *ab*. B représente le couvercle de la chaudière dont on veut évaluer la température. CD cloison en bois à laquelle est fixé le manomètre-thermomètre, et qui le sépare de la chaudière.

La réunion des deux parties du tube capillaire *ab* se fait en amenant les bouts en contact, et en mastiquant par-dessus les deux bouts, qui ont le même diamètre, une petite tubulure *g* en laiton qui passe exactement à frottement. Cette tubulure reçoit un troisième tube capillaire *h* qui sert à mettre l'appareil en communication avec une pompe pneumatique, au moyen de laquelle on peut dessécher l'appareil et y introduire le gaz.

On commence par dessécher complétement l'appareil. A cet effet, on fait passer un peu de mercure dans le tube *bd*, et l'on tourne le robinet *r* de manière qu'il n'y ait communication du tube *bd*, ni avec le tube *cd*, ni avec l'ouverture libre du robinet; puis on met le tube *h* en communication avec

une pompe aspirante munie de plusieurs tubes remplis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique concentré, qui sont destinés à absorber l'humidité. On fait le vide un grand nombre de fois, et on laisse rentrer chaque fois l'air très-lentement. Pour être sûr que la dessiccation est complète, on maintient le ballon chauffé à 50 ou 60°. On sépare alors la pompe, mais en laissant le tube *h* en communication avec un tube desséchant.

Cela fait, on enveloppe le ballon A de glace fondante, on établit la communication entre les tubes *bd*, *cd;* on verse du mercure dans le manomètre, de façon à affleurer le sommet de la colonne à un trait de repère *f* tracé sur le tube *bd*, très-près de son extrémité supérieure. Les deux colonnes de mercure se mettent de niveau, puisque l'appareil communique avec l'atmosphère par le tube *h*. On ferme alors le tube *h* à la lampe.

Si l'on voulait que la pression dans l'appareil fût inférieure à l'atmosphère, on pomperait par le tube *h*, et par la différence de niveau dans les deux colonnes du manomètre, on jugerait quand la raréfaction serait convenable; on fermerait alors l'appareil en fondant à la lampe le tube *h*, puis on verserait du mercure dans le manomètre de manière à affleurer le ménisque au repère *f*.

Soit :

- H — la pression atmosphérique.
- *h* — la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre quand le ballon A est dans la glace fondante;
- H — h — la force élastique du gaz dans l'appareil.
- V — la capacité à 0° du ballon A et de la portion du tube capillaire qui sera dans la chaudière.
- *v* — le petit volume d'air contenu dans la portion *bf* du tube.
- *v'* — *id.* dans le tube *ab* et l'appendice *gh;*
- *t* — la température indiquée par un thermomètre placé près de *bf;*
- *t'* — *id.* *id.* près de *ab*.
- *t* et *t'* doivent être les températures moyennes de l'air dans ces tubes, et dans la formule suivante on les suppose les mêmes avant et après l'expérience.
- δ — la densité de l'air à 0° et sous la pression de 760 millimètres;
- α — le coefficient de dilatation de l'air pour une force élastique initiale H — h.

Le poids de l'air contenu dans le thermomètre a pour expression :

$$\left(V+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta\times\frac{H-h}{760}.$$

Le ballon A étant placé dans la chaudière ou dans tout autre milieu dont on veut évaluer la température, appelant :

- *x* — la température à déterminer;
- *k* — le coefficient de dilatation du verre du ballon A,
- H' — la pression barométrique au moment où se termine l'expérience, H' ne peut différer de H que de très-peu;

h' la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre;
$H' \pm h'$ la force élastique du gaz dans l'appareil. Le niveau de mercure devant être maintenu en f dans le tube bd, ce que l'on fait en introduisant du mercure dans le manomètre, h' s'ajoute à H' ou s'en retranche suivant que le niveau du mercure est au-dessus ou au-dessous du repère f dans le tube cd.

Le poids de l'air contenu dans l'appareil prend alors pour expression

$$\left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x}+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta\times\frac{H'\pm h'}{760}.$$

Le poids de l'air de l'appareil n'ayant évidemment pas changé, on a

$$\left(V+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)(H-h)=\left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x}+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)(H'\pm h').$$

Équation de laquelle on tire x.

Quand l'air est introduit à la pression atmosphérique H dans l'appareil, on fait $h=0$, et on remplace $\pm h'$ par $+h'$ dans les expressions et la formule précédentes.

On conçoit qu'un second thermomètre à gaz, placé à côté du premier dans des conditions identiques, fournirait une formule semblable à la précédente, et donnerait pour x la même valeur que celle-ci, si les deux thermomètres sont comparables. C'est en opérant ainsi que M. Regnault a reconnu :

1° Que l'air atmosphérique suit la même loi de dilatation depuis 0° jusqu'à 300°, lors même que sa force élastique initiale à 0° varie depuis 0m,400 jusqu'à 1m,300 ; d'où il résulte que dans la construction d'un thermomètre à air on n'aura pas à se préoccuper de la densité de l'air introduit; *les instruments seront comparables quelle que soit cette densité.*

2° L'air atmosphérique, l'hydrogène et l'acide carbonique possèdent, entre 0° et 350°, sensiblement la même loi de dilatation, bien que leurs coefficients de dilatation soient notablement différents. Ainsi des thermomètres construits avec ces différents gaz marcheront d'accord, pourvu que l'on calcule les températures avec le coefficient propre à chacun d'eux. Il résulte de là que les coefficients de dilatation de ces gaz présentent sensiblement le même rapport à toutes les températures.

3° Le gaz acide sulfureux s'écarte notablement de la loi de dilatation que présentent les gaz précédents. Le coefficient de dilatation de l'acide sulfureux diminue avec la température prise sur le thermomètre à air; c'est ce que fait voir le tableau suivant, qui donne le coefficient moyen de dilatation par degrés centigrades :

de 0° à 98°,12	0,0038251
id. 102°,45	0,0038225
id. 185°,42	0,0037999
id. 257°,17	0,0037923
id. 299°,90	0,0037913
id. 310°,31	0,0037893

Il est évident que la variation du coefficient de dilatation réel est encore plus considérable que ne l'indique le tableau, qui donne les coefficients moyens toujours à partir de 0°.

Lorsqu'on n'a qu'une température à déterminer, on peut opérer ainsi qu'il suit avec le thermomètre à air.

On munit la tubulure *g*, *fig.* 52, d'un robinet semblable au robinet *r*. Établissant la communication de *bg* avec *gh*, on remplit le manomètre de mercure jusqu'au point *g*; on intercepte cette communication, puis on établit la communication du ballon A avec *gh*, et on remplit ce ballon d'air sec. Cela fait, on place le ballon dans l'enceinte, de manière qu'une très-petite portion de son tube capillaire, qui peut être droit suivant les circonstances, sorte de l'enceinte; on laisse libre la communication du ballon avec le tube desséchant. Au moment où l'on veut déterminer la température, on supprime toute communication de *gh* avec A et le manomètre, et on observe le baromètre qui donne la pression atmosphérique à cet instant. On retire l'appareil et on le laisse revenir à la température ambiante.

On enveloppe le réservoir A et son tube capillaire de glace fondante, puis on fait couler le mercure du manomètre, de façon à avoir dans le tube *df* une dépression de 6 à 7 décimètres au-dessous du niveau *ab*; on établit alors la communication entre le ballon A et le manomètre, une portion de l'air du ballon A passe dans le tube *df*. On verse du mercure dans le tube *cd* pour amener exactement le niveau au repère *f* marqué sur le tube *bd*. On mesure la différence des colonnes de mercure du manomètre, et l'on observe de nouveau la hauteur du baromètre.

Appelant :

V la capacité du ballon et de son tube capillaire jusqu'à *g* à 0°;
H la hauteur barométrique au moment de la fermeture du robinet *g*;
T la température de l'enceinte et du réservoir au moment de la fermeture du robinet *g*;
v la capacité du tube capillaire *gbf*;
h la différence de hauteur des deux colonnes du manomètre quand l'air de l'appareil est ramené à 0°;
H' la hauteur du baromètre à cet instant;
t la température marquée par un thermomètre dans le voisinage du tube *gbf*;
k et α les coefficients de dilatation de l'enveloppe et du gaz.

Le poids de l'air contenu dans l'appareil a pour expression, quand on ferme le robinet *g* :

$$V\frac{1+kT}{1+\alpha T}\times\delta\times\frac{H}{760}.$$

Ce poids, quand l'appareil est à 0°, a pour expression

$$\left(V+v\frac{1}{1+\alpha t}\right)\delta\times\frac{H'-h}{760}.$$

On a donc, en égalant ces deux poids, supprimant les facteurs communs et divisant par V :

$$\frac{1+kT}{1+\alpha T}H = \left(1+\frac{v}{V}\times\frac{1}{1+\alpha t}\right)(H'-h).$$

Équation qui donne la valeur de T.

L'avantage principal de cette manière d'opérer consiste en ce que le réservoir éprouve toujours la même pression sur ses parois intérieure et extérieure pendant qu'il est échauffé, et qu'il n'y a pas de déformation permanente à craindre tant que l'on n'atteindra pas la température à laquelle le verre commence à se ramollir.

248. *Pyromètre à air* (250). La disposition précédente est aussi très-convenable pour un pyromètre à air. Le ballon de verre A est remplacé dans ce cas par une boule en platine d'une aussi grande capacité que possible, sur laquelle on a soudé à l'or un tube capillaire en platine; que l'on pourra fabriquer en étirant à la filière un tube d'un diamètre plus grand rempli de plomb ou d'étain. Quand le tube est étiré, on fait fondre le plomb ou l'étain, dont on facilite l'écoulement avec un petit fil de fer. On achève le nettoyage du tube avec un acide.

La sensibilité de l'appareil sera moins grande dans les hautes que dans les basses températures; mais elle sera toujours suffisante, parce que la mesure des forces élastiques du gaz comporte une grande précision.

Suivant que l'appareil aura été porté à la température de

60, 1000, 1500, 2000°,

à 0°, la force élastique en mill. sera respectivement :

237, 163, 117, 91.

La plus grande cause d'incertitude provient de ce que l'on ne connaît pas la loi de la dilatation de l'enveloppe, c'est-à-dire les valeurs de k à ces hautes températures; mais cette cause ne peut jamais amener d'erreurs bien considérables.

Il convient, toutes les fois que cela est possible, de disposer le thermomètre à air de manière à ce qu'on puisse déterminer directement, par l'expérience, les forces élastiques à 0° et à 100°, le réservoir étant plongé dans la glace fondante ou maintenu dans la vapeur de l'eau bouillante. Mais il arrivera souvent que la détermination directe des deux points fixes de l'échelle thermométrique sera impossible, lorsque, par exemple, le thermomètre est disposé dans des vases où il est difficile de pénétrer; on est obligé alors de prendre le point de départ du thermomètre à air à la température du milieu ambiant prise sur un thermomètre à mercure, et de déduire ensuite par le calcul les éléments qui conviennent à l'appareil pour la température de la glace fondante.

Si le thermomètre renferme de l'air ayant une force élastique de 760 millim. à 0°, aux températures plus élevées :

100°, 200°, 300°, 350°, 400°, 500°, 600°, 700°, 800°,

il présentera les forces élastiques respectives :

1036, 1311, 1584, 1720, 1856, 2126, 2394, 2661, 2925 millim.

Si la température ne dépasse pas 350°, la force élastique de l'air intérieur ne deviendra pas plus grande que 1720 millim.; la pression effective, sur les parois, ne dépassera pas 1720 — 760 = 960 millim.; elle sera donc trop faible pour qu'il y ait à craindre une déformation permanente de l'enveloppe. Mais dans les températures plus élevées, on a à craindre une déformation permanente pour deux raisons :

1° La pression intérieure devient considérable;

2° Le verre peut éprouver un ramollissement sensible.

Il convient donc d'introduire dans le thermomètre de l'air avec une force élastique plus faible, lorsque le thermomètre est destiné à la mesure de températures très-élevées. Si l'air présentait à 0° une force élastique de 300 millim., il acquerrait à 500° une force élastique de 850 millim., qui ne surpasse la pression extérieure que de 90 millim.

249. *Thermomètre à mercure.* Ce thermomètre n'étant pas un instrument comparable au delà des températures qui ont servi à déterminer les points fixes de son échelle, il est clair que l'on ne devra pas s'en servir, dans des expériences précises, pour mesurer des températures élevées, et qu'il faudra avoir recours au thermomètre à air (247). Mais l'emploi de ce dernier appareil est beaucoup plus difficile; il exige des manipulations très-délicates, et il peut se présenter des circonstances dans lesquelles le thermomètre à air devient complétement inapplicable: telle est, par exemple, celle où on l'on aura à déterminer des températures dans des espaces très-rétrécis; il faudra alors se servir nécessairement d'un thermomètre à mercure; mais il conviendra de faire préalablement une comparaison directe de cet instrument avec un thermomètre à air.

En opérant comme pour des thermomètres de gaz différents (p. 307), M. Regnault a comparé au thermomètre à air des thermomètres à mercure faits avec différents verres; le tableau suivant contient les résultats qu'il a obtenus.

TEMPÉRATURES du thermomètre à air.	TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A MERCURE.			
	Cristal de Choisy-le-Roi.	Verre ordinaire à tubes, ballons et cornues.	Verre vert peu fusible.	Verre de Suède très-infusible.
100°	100°.00	100°.00	100°.00	100°.00
110	110.05	109.98	110.03	110.02
120	120.12	119.95	120.08	120.04
130	130.20	129.91	130.14	130.07
140	140.29	139.85	140.21	140.11
150	150.40	149.80	150.30	150.15
160	160.52	159.74	100.40	100.20
170	170.65	169.68	170.50	170.26
180	180.80	179.63	180.00	180.33
190	191.01	189.65	190.70	190.41
200	201.25	199.70	200.80	200.50
210	211.53	209.75	211.00	210.61
220	221.82	219.80	221.20	220.75
230	232.16	229.85	231.42	230.90
240	242.55	239.90	241.60	241.16
250	258.00	250.05	251.85	251.44
260	203.44	260.20	202.15	
270	273.90	270.38	272.50	
280	284.48	280.52	282.85	
290	295.10	290.80	293.30.	
300	305.72	301.08		
310	316.45	311.45		
320	327.25	321.80		
330	338.22	332.40		
340	349.30	343.00		
350	360.50	354.00		

Compositions chimiques moyennes des enveloppes de ces thermomètres à mercure, densités de ces enveloppes, dilatation k de ces enveloppes quand on porte leur température de 0° à 100°, et dilatation apparente k' du mercure qu'elles contiennent pour la même élévation de température.

	Cristal de Choisy-le-Roi.	Verre ordinaire à tubes, ballons et cornues.	Verre vert peu fusible.	Verre de Suède très-infusible.
Silice.	54.16	70.48	68.58	71.37
Alumine. . . .	0.52	0.40	1.28	0.33
Oxyde de fer. .	»	0.28	1.84	Traces.
Oxyde de manganèse. . . .	»	0.19	0.46	Id.
Chaux.	0.36	8.75	14.07	9.36
Potasse.	9.23	2.14	2.00	17.23
Soude.	0.90	17.20	12.00	1.79
Magnésie. . . .	»	»	»	Traces.
Oxyde de plomb	34.62	»	»	»
	99.79	99.50	100.18	100.08
Densités. . . .	3.304	2.455	2.481	2.410
$k=$	0.002144	0.002686	0.002324	0.002492
$k'=$	0.015974	0.015426	0.015789	0.015621

M. Regnault a posé la formule d'interpolation à deux termes suivante,

pour établir *la relation qui existe entre la dilatation cubique du verre et sa température.* Cette formule ne représente pas ses observations d'une manière satisfaisante; mais elle suffit cependant lorsqu'on se propose seulement de calculer les tables de dilatation du verre, qui sont nécessaires pour corriger les thermomètres à air des dilatations de leurs enveloppes.

Cette formule est :

$$k_T = a + bT + cT^2.$$

k^T dilatation cubique du verre de 0° à T°;
T température indiquée par le thermomètre à air :
$a = 0$ pour le cristal de Choisy-le-Roi, et $a = 0$ pour le verre ordinaire;
$\log b = \bar{4},1957769$ *id.* et $\log b = \bar{5},4171928$ *id.*
$\log c = \bar{8},2580666$ *id.* et $\log c = \bar{8},1691500$ *id.*

C'est à l'aide de cette formule que M. Regnault a calculé le tableau suivant, pour le cristal de Choisy-le-Roi et le verre ordinaire en tubes, seules qualités de verre qu'il ait employées à la construction des thermomètres à air.

Comme les dilatations absolues du mercure croissent à peu près proportionnellement aux températures, les résultats obtenus par M. Regnault se trouvent représentés d'une manière satisfaisante par la formule d'interpolation à deux termes

$$\delta_T = bT + cT^2,$$

dont les constantes ont été calculées avec les données suivantes :

$$T = 150°,\ \delta_T = 0,027\,419, \quad \text{et} \quad T = 300°,\ \delta_T = 0,055\,973.$$

δ_T dilatation absolue du mercure quand on porte sa température de 0° à T°, en admettant la valeur de k_T du tableau suivant;
T température indiquée par le thermomètre à air;
$\log b = \bar{4},2528690$, $\log c = \bar{8},4019441$.

C'est à l'aide de cette dernière formule que l'on a calculé les dilatations δ_T du tableau suivant.

La cinquième colonne du tableau donne les coefficients réels de dilatation absolue du mercure, lorsqu'il passe de la température T à celle immédiatement supérieure $T + dT$. Ces coefficients, qui représentent les inclinaisons de la tangente en chaque point de la courbe ayant les valeurs de T pour abscisses et celles de δ_T pour ordonnées, sont donnés par la relation

$$\frac{d\delta_T}{dT} = b + 2cT.$$

La sixième colonne du tableau contient la température θ que marque-

rait un thermomètre qui serait fondé sur la dilatation absolue du mercure. Ces températures sont données par la formule

$$\theta = 100 \times \frac{\delta_T}{\delta_{100}} = 100 \frac{\delta_T}{0{,}018\,153}.$$

TEMPÉRATURE du therm. à air. T	DILATATION CUBIQUE k_T de 0° à T°. CRISTAL de Choisy-le-Roi.	VERRE ordinaire.	DILATATION absolue du mercure de 0° à T°. δ_T.	COEFFICIENT réel de dilatation à T°. $\frac{d\delta_T}{dT}$	TEMPÉRATURE déduite de la dilatation absolue du mercure. θ
0°	6.606006	0.0006006	6.660600	6.06017965	6°
16	0.060227	6.0062628	0 661702	17950	6.872
26	454	5285	3560	18601	19.776
30	681	7973	5393	18051	20.706
46	009	0.6016686	7201	18162	30.668
56	0.001137	13435	0613	18152	46.656
60	1368	16211	0.010831	18263	50.665
76	1594	16016	12655	18253	69.713
86	1825	21851	14482	18304	70.777
90	2054	24716	16315	18354	89.875
160	0.602284	0.0627606	0.018153	0.00618405	106 »
110	2516	30532	19996	18455	110.153
126	2747	33486	21844	18505	120.333
130	2686	36468	23697	18556	136.540
140	3212	39476	25555	18606	140.776
156	3445	42525	27416	18657	151.044
160	3678	45666	20287	18767	161.334
176	3612	48705	31166	18758	171 652
180	4146	51822	33036	18808	182.003
166	4386	54967	34622	18859	162.376
266	6.004616	6.0058171	0.036811	0.06618609	202.782
210	4851	61383	38764	18659	213.210
226	5088	64636	40663	16010	223 671
236	5325	67910	42566	16661	234 154
240	5561	71232	44415	19111	244.676
250	5790	74559	40329	16161	255.214
260	6037	77922	48247	16212	265.780
270	6275	81324	56171	16262	276.379
286	6514	84756	52160	16313	287.665
206	6753	88218	54034	16363	297.659
300	0.006994	0.0061686	0.655973	6.66616413	308 346
310	7234	0.201	57617	19464	316.648
326	7474	08752	56866	16515	326 786
330	7716	0.0102333	61820	16565	340.556
346	7058	165944	63778	19616	351.336
350	8160	166585	65743	16666	362.166

Si l'on voulait avoir la dilatation moyenne pour 1°, de 0° à T°, il suffirait de diviser le nombre d'une des colonnes deux, trois, quatre, correspondant à T°, par T; ainsi, par exemple, le coefficient moyen de dilatation du cristal de Choisy-le-Roi, entre 0° et T = 200° est

$$\frac{0{,}004\,616}{200} = 0{,}000\,023\,08.$$

250. *Pyromètre de Wedgwood* (248). Cet instrument, fondé sur le retrait qu'éprouve un cône d'argile lorsqu'on le soumet à une température élevée, sert à évaluer les hautes températures. Le 0° de cet instrument correspond à la température de 580°,56 centigrades; c'est la température du rouge naissant, à laquelle on fait recuire les cônes d'argile. L'échelle porte ensuite 240 divisions qu'on suppose équivaloir chacune à 72°.22 centigrades. L'échelle est placée sur une règle accompagnée d'une autre faisant avec la première un certain angle; de sorte qu'en faisant glisser entre ces deux règles le cône d'argile, qui a été placé pendant un temps convenable dans le milieu dont on veut mesurer la température pour prendre lui-même cette température, le point de l'échelle où il s'arrête indique la température cherchée. Le retrait de l'argile pouvant ne pas être proportionnel à la température, on ne doit regarder les indications du pyromètre que comme des valeurs approchées. Cet instrument est surtout utile pour reconnaître les variations de température.

251. *TABLEAU de la température de fusion de quelques corps.*

DÉSIGNATION DES CORPS.	TEMPÉRATURE en degrés centigr.	DÉSIGNATION DES CORPS.	TEMPÉRATURE en degrés centigr.
Mercure.	—39°	Alliage de étain 1 part., plomb 1.	241
Essence de térébenthine.	—10	id 1, id. 3.	289
Glace.	0	id. 2, id. 1.	196
Suif.	33.33	id. 3, id. 1.	186
Phosphore.	43	id. 4, id. 1.	189
Acide acétique.	45	id. 5, id. 1.	194
Stéarine.	43 à 49	Étain.	230
Spermacéti.	49	Bismuth.	256
Acide margarique.	55 à 60	Plomb.	334
Potassium.	58	Zinc.	360
Cire non blanchie.	61	Antimoine.	432
Cire blanche.	68	Bronze.	900
Acide stéarique.	70	Argent très-pur.	1000
Sodium.	90	Or au titre des monnaies.	1180
Alliage de plomb 1 part., étain 1, bismuth 4	94	Or très pur.	1250
id. 5, id. 3, id. 8	100	Fonte blanche très-fusible.	1050
id. 2, id. 3. id. 5	100	Fonte blanche peu fusible.	1100
Iode.	107	Fonte grise très-fusible.	1100
Soufre.	109	Fonte grise, 2e fusion.	1200
Alliage de étain 4 part., bismuth 5, plomb 1	118.9	Fonte manganésée.	1250
id. 1, id. 1.	141.2	Aciers, les plus fusibles.	1300
id. 2, id. 1.	167.7	Aciers, les moins fusibles.	1400
id. 3, plomb 1.	167.7	Fer doux français.	1500
id. 3, bismuth 1.	200	Fer martelé anglais.	1600

252. ***TABLEAU** des températures correspondant à différentes nuances lumineuses, d'après les expériences de M. Pouillet, à l'aide d'un pyromètre à air* (page 304).

NUANCES.	TEMPÉRATURES en degrés centigr.	NUANCES.	TEMPÉRATURES en degrés centigr.
Rouge naissant.	525	Orange foncé	1100
Rouge sombre.	700	Orange clair.	1200
Cerise naissant.	800	Blanc.	1300
Cerise.	900	Blanc suant.	1400
Cerise clair.	1000	Blanc éblouissant. . . .	1500

DILATATION.

253. ***Dilatation des solides par la chaleur.*** Tous les corps jouissent de la propriété de se dilater par la chaleur, mais à des degrés différents.

***TABLEAU** de la dilatation linéaire, c'est-à-dire de l'accroissement de chacune des dimensions, longueur, largeur et épaisseur des corps solides, quand on porte la température de ces corps de 0° à 100°, en prenant pour unité la dimension choisie à 0°.* La dilatation moyenne pour 1° s'obtiendrait en divisant par 100 les nombres du tableau.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DILATATIONS EN FRACTIONS décimales.	DILATATIONS EN FRACTIONS ordinaires.
1° D'APRÈS LAVOISIER ET LAPLACE.		
Flint-glass anglais	0.000 811 66	1/1248
Platine (selon Borda).	0.000 856 55	1/1167
Verre de France avec plomb.	0.000 871 99	1/1147
Tube de verre sans plomb.	0.000 875 72	1/1142
Id.	0.000 896 94	1/1115
Id.	0.000 897 60	1/1114
Id.	0.000 917 50	1/1090
Verre de Saint-Gobain.	0.000 890 89	1/1122
Acier non trempé.	0.001 078 80	1/927
Id.	0.001 079 15	1/927
Id.	0.001 079 60	1/926
Acier trempé jaune, recuit à 65°.	0.001 239 56	1/807
Fer doux forgé.	0.001 220 45	1/819
Fer rond passé à la filière.	0.001 235 04	1/812
Or de départ.	0.001 466 06	1/682
Or au titre de Paris, recuit.	0.001 513 61	1/661
Id. non recuit.	0.001 551 55	1/645

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DILATATIONS EN FRACTIONS décimales.	DILATATIONS EN FRACTIONS ordinaires.
Cuivre	0.001 712 20	1/584
Id.	0.001 717 33	1/582
Id.	0.001 722 40	1/581
Cuivre jaune ou laiton	0.001 866 70	1/535
Id.	0.001 878 21	1/533
Id.	0.001 889 70	1/529
Argent au titre de Paris	0.001 908 68	1/524
Argent de coupelle	0.001 909 74	1/524
Étain des Indes ou de Malacca	0.001 937 65	1/516
Étain de Falmouth	0.002 172 98	1/462
Plomb	0.002 848 36	1/351
2° D'APRÈS SMEATON.		
Verre blanc (tubes de baromètres)	0.000 833 33	1/1175
Régule martial d'antimoine	0.001 083 33	1/923
Acier	0.001 150 00	1/870
Acier trempé	0.001 225 00	1/816
Fer	0.001 258 33	1/795
Bismuth	0.001 391 67	1/719
Cuivre rouge battu	0.001 700 00	1/588
Cuivre rouge 8 parties, étain 1 partie	0.001 816 67	1/550
Cuivre jaune fondu	0.001 875 00	1/533
Cuivre jaune 16 parties, étain 1 partie	0.001 908 33	1/524
Fil de laiton	0.001 933 33	1/517
Métal de miroir de télescope	0.001 933 33	1/517
Soudure, cuivre 2 parties, zinc 1 partie	0.002 058 33	1/486
Étain fin	0.002 283 33	1/438
Étain en grains	0.002 483 33	1/403
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2 parties	0.002 505 33	1/399
Zinc 8 parties, étain 1 partie, un peu forgé	0.002 691 67	1/372
Plomb	0.002 860 67	1/349
Zinc	0.002 941 67	1/340
Zinc allongé au marteau de $\frac{1}{12}$	0.003 108 33	1/322
3° D'APRÈS LE MAJOR GÉNÉRAL ROY.		
Verre en tube	0.000 775 50	1/1289
Verre en verge solide	0.000 808 33	1/1237
Fer fondu (prisme de)	0.001 110 00	1/901
Acier (verge d')	0.001 144 50	1/874
Cuivre jaune de Hambourg	0.001 855 50	1/539
Cuivre jaune anglais, en forme de verge	0.001 892 96	1/528
Id. en forme d'auge ou canal rectangulaire	0.001 894 50	1/528
4° D'APRÈS M. TROUGHTON.		
Platine	0.000 991 80	1/1008
Acier	0.001 189 90	1/840
Fer tiré à la fillère	0.001 440 10	1/694
Cuivre	0.001 918 80	1/521
Argent	0.002 082 60	1/480

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DILATATIONS EN FRACTIONS	
	décimales.	ordinaires.
5° D'APRÈS M. WOLLASTON.		
Palladium.	0.001 000 00	1/1000
6° D'APRÈS MM. DULONG ET PETIT.		
Platine, de 0° à 100°.	0.000 884 20	1/1131
Id. de 0° à 300°.	0.002 754 82	1/363
Verre de 0° à 100°.	0.000 861 33	1/1161
Id. de 0° à 200°.	0.001 845 02	1/544
Id. de 0° à 300°.	0.003 032 52	1/329
Fer de 0° à 100°.	0.001 182 10	1/846
Fer de 0° à 300°.	0.004 405 28	1/227
Cuivre de 0° à 100°.	0.001 718 20	1/582
Id. de 0° à 300°.	0.005 649 72	1/177

Pour des températures inférieures à 100°, la dilatation est à peu près proportionnelle au nombre de degrés ; mais au delà, d'après les expériences de Dulong et Petit, dont les résultats sont consignés au tableau précédent, la dilatation croît sensiblement avec le degré de température.

La dilatation superficielle d'un solide est à peu près égale au double de sa dilatation linéaire, c'est-à-dire que si, pour un certain nombre de degrés, la longueur d'un solide augmente de 1/100 de sa longueur à 0°, sa surface augmentera, pour le même nombre de degrés, de 2/100 de sa surface à 0°.

La dilatation cubique des solides est à peu près égale au triple de la dilatation linéaire.

254. *Dilatation des liquides par la chaleur.*

***TABLEAU** de la dilatation apparente de quelques liquides, dans le verre, lorsqu'on élève leur température de 0° à 100°.* **La dilatation pour 1° s'obtiendrait en divisant par 100 les nombres du tableau.**

DÉSIGNATION DES LIQUIDES.	DILATATIONS APPARENTES EN	
	fractions décimales.	fractions ordinaires.
Eau.	0.046 6	1/22
Acide chlorhydrique (densité 1.137).	0.060 0	1/17
Acide azotique (densité 1.40).	0.110 0	1/9
Acide sulfurique (densité 1.85).	0.060 0	1/17
Éther sulfurique.	0.070 0	1/14
Huile d'olive et de lin.	0.080 0	1/12

DÉSIGNATION DES LIQUIDES.	DILATATIONS APPARENTES EN	
	fractions décimales.	fractions ordinaires.
Essence de térébenthine	0.070 0	1/14
Eau saturée de sel marin	0.050 0	1/20
Alcool	0.110 0	1/9
Mercure	0.015 6	1/64
DILATATION ABSOLUE.		
Mercure, de 0° à 100° (Dulong et Petit)	0.018 018 0	1/55.50
Id. de 100° à 200° . . . . *id.*	0.018 433 1	1/54.25
Id. de 200° à 300° . . . . *id.*	0.018 867 9	1/53
Id. de 0° à 100 (M. Regnault)	0.018 153	1/55.12

255. *Dilatation des gaz par la chaleur.* D'après les expériences de M. Gay-Lussac, tous les gaz, soumis à une pression constante, se dilatent de la même manière, et de $\frac{1}{267} = 0{,}00375$ de leur volume à 0°, par degré centigrade; mais de nouvelles expériences, faites par M. Rudberg, ont donné 0,003646, et d'autres, plus récentes encore, faites par M. Regnault, ont donné pour l'air sec 0,003670, qui diffère peu de $0{,}003666.... = \frac{11}{3000}$, valeur très-commode à employer dans les calculs.

Lorsque l'air conserve le même volume, M. Regnault adopte le coefficient de dilatation 0,003665.

TABLEAU de la dilatation absolue de quelques gaz lorsqu'on porte leur température de 0° à 100°, d'après les expériences de M. Regnault.

DÉSIGNATION DES GAZ.	DILATATION	
	sous volume constant.	sous pression constante.
Hydrogène	0.3667	0.3661
Air atmosphérique	0.3665	0.3670
Azote	0 3668	»
Oxyde de carbone	0.3667	0.3669
Acide carbonique	0.3688	0.3710
Protoxyde d'azote	0.3676	0.3719
Acide sulfureux	0.3845	0.3903
Cyanogène	0.3829	0.3877

Ces résultats font voir que les coefficients de dilatation des gaz ne sont pas égaux, comme on l'a admis jusqu'ici.

TABLEAU de la dilatation de l'air à différentes pressions, sous volume constant.

PRESSION à 0°.	PRESSION à 100°.	DENSITÉ de l'air à 0°, en posant = 1, celle de l'air à 0° sous la pression 760mm.	DILATATION.
mm.	mm.		
109.72	149.01	0.1444	0.36482
174.36	237.17	0.2294	0.36513
266.06	395.07	0.3501	0.36542
374.67	510.35	0.4930	0.36587
375.23	510.97	0.4937	0.36572
760.00	....	1.0000	0.36650
1678.40	2286.09	2 2084	0.36760
1692.53	2306.23	2.2270	0.36800
2144.18	2924.04	2.8213	0.36804
3655.56	4992.09	4.8100	0.37091

Résultats analogues fournis par l'acide carbonique.

PRESSION à 0°.	PRESSION à 100°.	DENSITÉ relative du gaz à 0°.	DILATATION.
mm.	mm.		
758 47	1034.54	1.0000	0.36856
901.09	1230.37	1.1879	0.36943
1742.73	2387.72	2.2976	0.37523
3589.07	4759.03	4.7318	0.38598

Dilatation de quelques gaz à différentes pressions, ces pressions restant constantes.

AIR.		HYDROGÈNE.		ACIDE CARBONIQUE.		ACIDE SULFUREUX.	
Pression.	Dilatation.	Pression	Dilatation.	Pression.	Dilatation.	Pression.	Dilatation.
mm.		mm.		mm.		mm.	
760	0.36706	760	0.36613	760	0.37099	760	0.3902
2525	0.36944	2545	0.36616	2520	0.38455	980	0.3980
2620	0.36904						

L'air atmosphérique suit la même loi de dilatation depuis 0° jusqu'à 350°, lors même que sa force élastique initiale à 0° est inférieure à l'atmosphère ; on peut donc employer de l'air à une pression inférieure à 0m,76 dans la construction des thermomètres (247, page 307).

256. *Influence de la température sur le volume des gaz.* On a, en supposant que la pression du gaz reste constante :

$$V' = V\frac{1+at'}{1+at}, \text{ et pour l'air } V' = V\frac{1+0{,}003\,67t'}{1+0{,}003\,67t}.$$

V volume du gaz à la température t;
V' volume que prend le gaz à la nouvelle température t';
a coefficient de dilatation du gaz ;
$1+at$ et $1+at'$ volumes que prend l'unité de volume du gaz à 0°, en passant aux températures t et t'.

Si la pression du gaz, au lieu de rester constante, avait changé, on aurait, en admettant la loi de Mariotte et en représentant par p la pression primitive, et par p' la pression nouvelle,

$$V' = V\frac{p}{p'} \times \frac{1+at'}{1+at}, \text{ et pour l'air } V' = V\frac{p}{p'} \times \frac{1+0{,}003\,67t'}{1+0{,}003\,67t}.$$

C'est-à-dire que les volumes d'un même gaz à deux températures et à deux pressions différentes sont entre eux comme les volumes que prend l'unité de volume à 0° en passant aux deux températures, et en raison inverse des pressions. Les densités sont en raison inverse des volumes.

COMPRESSIBILITÉ.

257. *Compressibilité des gaz.* Mariotte avait posé pour tous les gaz la loi très-simple : *les volumes d'une même quantité de gaz dont la température reste constante varient en raison inverse des pressions* (256).

D'après les dernières expériences de M. Regnault, les gaz ne se comportent pas de la même manière, et ne suivent pas tout à fait cette loi.

M. Regnault a posé les formules suivantes pour représenter les résultats de ses expériences.

Appelant :

$m = \frac{V_0}{V}$ le rapport du volume V_0 d'un gaz sous la pression 1m,00 de mercure, au volume V qu'on lui fait prendre ;
P la pression en mètres que prend le gaz réduit au volume V;
A et B des constantes,

On a :

1° pour l'air atmosphérique.

$$P = m[1 - A(m-1) + B(m-1)^2],$$
$$\log A = \bar{3},0435120 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{5},2873751\,;$$

2° Pour l'azote,

$$P = m[1 - A(m-1) + B(m-1)^2],$$
$$\log A = \bar{4},8389375 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{0},8476020\,;$$

3° Pour l'acide carbonique,

$$P = m[1 - A(m-1) - B(m-1)^2],$$
$$\log A = \bar{3},9310399 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{6},8624721\,;$$

4° Pour l'hydrogène,

$$P = m[1 + A(m-1) + B(m-1)^2],$$
$$\log A = \bar{4},7381736 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{0},9250787. \qquad (\textit{Int.}, 334)$$

C'est à l'aide de ces formules qu'ont été calculés les résultats du tableau suivant, qui s'écartent, comme l'on voit, sensiblement de la loi de Mariotte.

VALEUR de *m*.	Pressions P correspondant aux valeurs de *m* pour			
	l'air.	l'azote.	l'acide carbonique.	l'hydrogène.
	m.	m.	m.	m.
1	1.000000	1.000000	1.00000	1.000000
2	1.997828	1.998634	1.98292	2.001110
3	2.993601	2.995944	2.94873	3.003384
4	3.987432	3.991972	3.89736	4.006856
5	4.979440	4.986760	4.82880	5.011015
6	5.969748	5.980350	5.74296	0.017076
7	6.958455	0.972791	0.63985	7.025102
8	7.945696	7.964112	7.51936	8.033944
9	8.931573	8 954301	8.38152	9.044244
10	9.910220	9.943590	9.22620	10.056070
11	10.899724	10.931833	10.05345	11.009454
12	11.882232	11.919120	10.86324	12.084450
13	12.863838	12.905516	11.05541	13.101114
14	13.844670	13.891032	12.43018	14.119504
15	14.824845	14.875770	13.18695	15.139650
16	15.804480	15.859712	13.92608	10.161632
17	16.783075	10.942920	14.64771	17.185470
18	17.702502	17.825436	15.35148	18.211230
19	18.741258	18 807321	16.03733	19.238963
20	19.719880	19.788580	10.70540	20.268720

Il convient de ne pas employer les formules précédentes pour des pressions qui dépassent notablement les plus élevées du tableau, limites auxquelles se sont élevées les expériences de M. Regnault.

Désignant par $z_1 - z_0$ la différence de niveau de deux points de l'atmosphère, par h la hauteur observée du baromètre au niveau z_0, et par $(h - \Delta h)$ la hauteur que marquerait ce même baromètre au niveau z_1, on peut, à cause de la petitesse de la correction, admettre la formule réduite

$$z_1 - z_0 = 18393^m \times \log \frac{h}{h - \Delta h}.$$

En supposant h égal constamment à $0^m,760$, la formule donne les résultats suivants :

$(z_1 - z_0)$	Δh	$z_1 - z_0$	Δh	$z_1 - z_0$	Δh	$z_1 - z_0$	Δh
mètres.	mm.	mètres.	mm.	mètres.	mm.	mètres.	mm.
1	0.095	7	0.666	13	1.236	19	1.806
2	0.190	8	0.761	14	1.331	20	1.901
3	0.285	9	0.856	15	1.426	21	1.997
4	0.380	10	0.951	16	1.521	22	2.092
5	0.475	11	1.046	17	1.616	23	2.187
6	0.571	12	1.141	18	1.711	24	2.282
	•					25	2.375

Ces différences de pressions ont été déterminées par M. Regnault dans ses expériences sur la compressibilité des gaz, pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique par suite de la variation du niveau du mercure dans le manomètre.

M. Regnault a aussi déterminé l'influence due à l'augmentation de densité du mercure par suite de sa compressibilité.

Appelant :

$\mu = 0.00000463$ le coefficient de compressibilité du mercure sous la pression d'une colonne de mercure de 1 mètre;

h la hauteur de la colonne de mercure normal, c'est-à-dire de mercure à 0° sous la pression atmosphérique, qui fait équilibre à la colonne z,

on a

$$h - z = \frac{\mu}{2}(z - 1{,}52)\,z;$$

formule qui donne les résultats suivants :

z	$h-z$	z	$h-z$	z	$h-z$	z	$h-z$
mètres.	mm.	mètres.	mm.	mètres.	mm.	mètres.	mm.
1	−0.0012	7	0.0886	14	0.4036	21	0.9450
1,52	0.0000	8	0.1198	15	0.4671	22	1.0406
2	+0.0024	9	0.1555	16	0.5352	23	1.1413
3	0.0102	10	0.1959	17	0.6079	24	1.2463
4	0.0229	11	0.2409	18	0.6853	25	1.3560
5	0.0402	12	0.2904	19	0.7672		
6	0.0619	13	0.3448	20	0.8538		

On voit que ces corrections sont très-faibles, et qu'on peut les négliger en pratique.

258. *Compressibilité des solides et des liquides.* Poisson, dans ses recherches sur l'élasticité, a posé la formule

$$k = \frac{3a}{2}.$$

a Allongement que subit un cylindre d'une matière quelconque homogène, lorsqu'une de ses bases est fixe et que l'autre est tirée dans le sens de sa longueur par une force égale à P sur chaque unité de surface;

k compression cubique que subit ce même cylindre lorsqu'il est soumis sur toute sa surface à une pression égale à P sur chaque unité de surface.

TABLEAU des valeurs de a d'une tige de 1 mètre de longueur, pour une traction égale à une atmosphère, c'est-à-dire pour $P = 0^k.010298$ *par millimètre de section, et de celles de* k, *calculées d'après la formule précédente.*

OPÉRATEURS.	MATIÈRES.	VALEURS de a.	VALEURS de k.
Colladon et Sturm.	Verre.	0.0000010298	0.0000015447
Savart	Verre.	0.0000017137 0.0000017007	0.0000025705 0.0000025510
Wertheim et Chevandier	Verre à vitre de Saint-Quirin.	0.0000013008	0.0000019512
	Glace de Cirey.	0.0000014680	0.0000022020
	Verre à gobeleterie de Valéristhal.	0.0000014946	0.0000022419
	Cristal blanc de Baccarat.	0.0000018822	0.0000028233
Wertheim.	Cuivre écroui et étiré.	0.000000828	0.000001242
	Id. *id.* *id.* et recuit.	0.000000980	0.000001469
	Laiton.	0.000001013	0.000001518

D'après les expériences de M. Regnault sur la compressibilité des liquides, appelant :

δ la compressibilité apparente ;

μ et k les compressibilités absolues du liquide et de l'enveloppe, calculées d'après des formules de M. Lamé,

on a en moyenne, pour une pression de une atmosphère, les valeurs du tableau suivant :

LIQUIDES.	VALEURS		
	de δ.	de μ.	de k.
Eau dans une sphère en cuivre rouge.	0.000046392	0.000047709	0.000001317
Id. *id.* en laiton.	0.000040847	0.000048288	0.000001440
Id. dans un cylindre de verre ordin. .	0.000044304	0.000046677	0.000002368
Mercure dans *id.*	0.000001234	0.000003517	0.000002374

Pour l'eau, la valeur de μ devant évidemment être la même quelle que soit l'enveloppe, comme les différences trouvées sont trop considérables pour qu'on puisse les attribuer aux erreurs d'observation, il faut admettre, ou que les formules mathématiques ne représentent pas exactement le phénomène, ou bien que les expériences ne réalisent pas convenablement les conditions admises dans l'établissement des formules.

La compressibilité du mercure, sous une charge égale au poids d'une colonne de mercure d'un mètre est

$$\mu' = 0,000\,004\,628.$$

M. Regnault a conclu de ses expériences, que la chaleur dégagée par une pression subite de 10 atmosphères sur l'eau est incapable d'élever sa température de 1/30 de degré centigrade.

CHALEUR SPÉCIFIQUE.

259. *Unité de chaleur.* On appelle unité de chaleur, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau de 0° à 1° (page 328).

260. *Chaleur spécifique.* La chaleur spécifique ou capacité calorique d'un corps est le nombre d'unités de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme de ce corps.

TABLEAU des chaleurs spécifiques de quelques corps, de 0° à 100°, d'après M. Regnault.

DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.
Fer.	0.11379
Zinc.	0.09555
Cuivre.	0.09515
Cadmium.	0.05669
Argent	0.05701
Arsenic.	0.08140
Plomb.	0.03140
Bismuth.	0.03084
Antimoine.	0.05077
Étain des Indes.	0.05623
Id. anglais.	0.05695
Nickel.	0.10863
Cobalt.	0.10696
Platine laminé.	0.03243
Id. en mousse.	0.03293
Palladium.	0.05927
Or.	0.03244
Soufre.	0.20259
Iode.	0.05412
Acier Haussmann.	0.11848
Fine-métal.	0.12728
Fonte de fer blanche de Bourgogne.	0.12983
Charbon.	0.24111
Phosphore de 10° à 30°.	0.1887
Phosphore de 0° à 100°, avec chaleur de fusion comprise.	0.25034 0.25250
Manganèse très-carburé.	0.14411
Mercure.	0.03332
ALLIAGES.	
Plomb 1 at., étain 1 at.	0.04073
Id. 1 at., étain 2 at.	0.04500
Id. 1 at., antimoine 1 at.	0.03880
Bismuth 1 at., étain 1 at.	0.04000
Id. 1 at., étain 2 at.	0.04504
Id. 1 at., étain 2 at., et antimoine 1 at.	0.04621
Bismuth 1 at., étain 2 at., antimoine 1 at., zinc 2 at.	0 05657
Plomb 1 at., étain 2 at., bismuth 1 at.	0.04476
Plomb 1 at., étain 2 at., bismuth 2 at.	0.06082
Mercure 1 at., étain 1 at.	0.07294
Id. 1 at., étain 2 at.	0.06591
Id. 1 at., plomb 1 at.	0.03827
Protoxyde de plomb en poudre.	0.05118
Protoxyde de plomb fondu.	0.05089

DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.
Oxyde de mercure.	0.05179
Protoxyde de manganèse.	0.15701
Oxyde de cuivre.	0.14201
Id. de nickel.	0.16234
Id. calciné à la forge.	0.15885
Magnésie.	0.24394
Oxyde de zinc.	0.12480
Peroxyde de fer (fer oligiste).	0.10695
Colcothar peu calciné.	0.17569
Colcothar calciné une deuxième fois.	0.17167
Colcothar fortement calciné.	0.10921
Colcothar fortement calciné une deuxième fois.	0.10707
Acide arsénieux.	0.12780
Oxyde de chrome.	0.17900
Id. de bismuth.	0.00053
Id. d'antimoine.	0.09009
Alumine (corindon).	0.19702
Id. (saphir).	0.21732
Acide stannique.	0.09320
Id. titanique artificiel.	0.17104
Id. titanique (rutile).	0.17032
Id. antimonieux.	0.09535
Id. tungstique.	0.07983
Id. molybdique.	0.13240
Id. silicique.	0.19132
Id. borique.	0.23743
Oxyde de fer magnétique.	0.16780
Protosulfure de fer.	0.13570
Sulfure de nickel.	0.12813
Id. de cobalt.	0.12512
Id. de zinc.	0.12303
Id. de plomb.	0.05080
Id. de mercure.	0.05117
Protosulfure d'étain.	0.08365
Sulfure d'antimoine.	0.08403
Id. de bismuth.	0 00002
Bisulfure de fer (pyrite).	0.13009
Id. d'étain.	0.11932
Sulfure de cuivre.	0.12118
Id. d'argent.	0.07460
Pyrite magnétique.	0.16023
Chlorure de sodium.	0.21401
Id. de potassium.	0 17295
Protochlorure de mercure.	0.05205
Id. de cuivre.	0.13827
Chlorure d'argent.	0.09109
Id. de baryum.	0.08957
Id. de strontium.	0.11990
Id. de calcium.	0.16420
Id. de magnésium.	0.19460

DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.	DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.
Chlorure de plomb.	0.06641	Borate de potasse	0.20478
Protochlorure de mercure. .	0.06889	*Id.* de soude.	0.25709
Chlorure de zinc.	0.13618	*Id.* de plomb $(B^2O^6 + 2RO)$.	0.00046
Perchlorure d'étain.	0.10161	Wolfram.	0.00780
Chlorure de manganèse. . .	0.14255	Zircon.	0.14558
Chloride d'étain.	0.14750	Carbonate de potasse. . . .	0.21623
Chlorure d'arsenic.	0.17604	*Id.* de soude.	0.27275
Fluorure de calcium.	0.21492	*Id.* de chaux (spath d'Islande) . .	0.20858
Nitrate de potasse.	0.23875	Aragonite.	0.20850
Id. de soude.	0.27821	Marbre saccharoïde gris. . .	0.20080
Id. d'argent.	0.14352	*Id.* blanc. .	0.21585
Id. de baryte.	0.15228	Craie blanche.	0.21485
Chlorate de potasse. . . .	0.20956	Carbonate de baryte. . . .	0.11038
Phosphate de potasse. . . .	0.19102	*Id.* de strontiane. . .	0.14483
Id. de soude.	0.22833	*Id.* de fer.	0.19345
Id. de plomb $(P^2O^5 + 2RO)$. .	0.08208	*Id.* de plomb. . . .	0.08596
Id. de plomb $(P^2O^5 + 3RO)$. .	0.07982	Dolomie.	0.21743
Arséniate de potasse. . . .	0.15631	Noir animal.	0.26085
Id. de plomb.	0.07280	Charbon de bois.	0.24150
Sulfate de potasse.	0.19010	Coke de canel-coal.	0.20307
Id. de soude	0.23115	*Id.* de la houille.	0.20085
Id. de baryte.	0.11285	Charbon de l'anthracite du pays de Galles.	0.20172
Id. de strontiane. . . .	0.14279	Charbon de l'anthracite de Philadelphie.	0.20100
Id. de plomb.	0.08723	Graphite naturel.	0.20187
Id. de chaux.	0.19656	*Id.* des hauts-fourneaux. . .	0.19702
Id. de magnésie.	0.22159	*Id.* des cornues à gaz. .	0.20360
Chromate de potasse. . . .	0.18505	Diamant.	0.14687
Bichromate de potasse. . .	0.18037		
Borate de potasse.	0.21075		
Id. de soude.	0.23823		
Id. de plomb $(B^2O^6 + RO)$.	0.11409		

DÉSIGNATION DES CORPS.	OPÉRATEURS.	
Chaux vive.	Lavoisier et Laplace.	0.2160
Huile d'olive.	*Id.*	0.3096
Acide sulfurique (densité 1.87).	*Id.*	0.3346
Acide azotique (densité 1.30).	*Id.*	0.6614
Vinaigre.	Dalton.	0.9200
Acide chlorhydrique (densité 1.53).	*Id.*	0.600
Alcool (densité 0.81).	*Id.*	0.700
Id. (densité 0.793).	*Id.*	0.622
Éther sulfurique (densité 0.76).	*Id.*	0.660
Id. (densité 0.715).	Despretz.	0.520
Essence de térébenthine (densité 0.872). . .	*Id.*	0.472
Bois de pin.	Mayer.	0.650
Bois de chêne.	*Id.*	0.570
Bois de poirier.	*Id.*	0.500
Flint-glass.	Dalton.	0.190
Chlorure de sodium.	*Id.*	0.230

DÉSIGNATION DES CORPS.	OPÉRATEURS.	CHALEURS spécifiques.
Mercure de 0° à 100°	Dulong et Petit.	0.0330
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.0350
Platine de 0 à 100	*Id.*	0.0335
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.0355
Antimoine de 0 à 100	*Id.*	0.0507
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.0547
Argent de 0 à 100	*Id.*	0.0557
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.0611
Zinc de 0 à 100	*Id.*	0.0927
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.1015
Cuivre de 0 à 100	*Id.*	0.0940
Id. de 0 à 200	*Id.*	0.1013
Fer de 0 à 100	*Id.*	0.1098
Id. de 0 à 200	*Id.*	0.1150
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.1218
Id. de 0 à 350	*Id.*	0.1255
Verre de 0 à 100	*Id.*	0.1770
Id. de 0 à 300	*Id.*	0.1900
Platine 100°	Pouillet.	0.03350
Id. 300	*Id.*	0.03435
Id. 500	*Id.*	0.03518
Id. 700	*Id.*	0.03600
Id. 1000	*Id.*	0.03718
Id. 1200	*Id.*	0.03818

La chaleur spécifique d'un même corps est à peu près constante pour des températures inférieures à 100°; mais au-dessus, elle croît sensiblement avec la température, et surtout au point où le corps commence à se ramollir. La chaleur spécifique d'un même corps diminue à mesure que l'état d'agrégation de ce corps devient plus grand. Cependant Dulong, en comparant les chaleurs spécifiques des corps simples aux poids atomiques de ces mêmes corps, a posé la loi : *Les chaleurs spécifiques des corps simples sont en raison inverse de leurs poids atomiques;* d'où il résulte que les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques sont un nombre constant; c'est en effet ce que vérifient sensiblement les résultats donnés par l'expérience.

Neumann a posé une loi semblable à la précédente, pour les corps composés; elle est : *Pour chaque classe des corps composés ayant la même composition atomique et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.* Cette loi vient d'être vérifiée par les expériences de M. Regnault, desquelles il résulte aussi que la chaleur spécifique d'un alliage est sensiblement la somme des quantités de chaleur nécessaires pour élever séparément de 1° la température de chaque quantité de métal qui entre dans 1 kilog. de l'alliage.

M. Regnault vient de faire des expériences pour déterminer la cha-

leur spécifique de l'eau à différentes températures. A l'aide de ses résultats, il a calculé une formule d'interpolation qui donne le nombre Q d'unités de chaleur absorbées par 1 kilog. d'eau quand on porte sa température de 0° à T°, en appelant *unité de chaleur* la chaleur qu'absorbe 1 kilog. d'eau à 0° pour s'échauffer de 1°.

Cette formule est

$$Q = T + AT^2 + BT^3. \qquad (a)$$

$A = 0{,}00002$ et $B = 0{,}0000003$ constantes déterminées pour les valeurs d'expérience $Q = 100{,}5$ et $Q = 203{,}3$, qui correspondent à $T = 100°$ et $T = 200°$.

La formule précédente revient donc à

$$Q = T + 0{,}00002T^2 + 0{,}0000003T^3.$$

La quantité de chaleur que 1 kilog. d'eau absorbe quand sa température passe de T° à (T + 1°), en supposant que pour chaque élément dT de ce degré l'absorption de chaleur soit la même, est donnée par la formule

$$\frac{dQ}{dT} = 1 + 0{,}00004T + 0{,}0000009T^2.$$

La quantité $\frac{dQ}{dT}$ est la tangente à la courbe représentée par l'équation (*a*), c'est-à-dire à la courbe dont les abscisses sont aux ordonnées correspondantes dans le rapport de Q à T, au point correspondant à la valeur de T (page 312).

C'est à l'aide de ces deux formules qu'a été calculé le tableau suivant, dont les résultats sont donnés pour les températures de 10° en 10° à partir de 0°.

TEMPÉRATURE du thermomètre à air T.	VALEUR de Q	CHALEUR spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T°.	CHALEUR SPÉCIFIQUE de l'eau. de T° à (T+dT)°. $\frac{dQ}{dT}$
0°	0.000	»	1.0000
10	10 002	1.0002	1.0005
20	20.010	1.0005	1.0012
30	30.020	1.0000	1.0020
40	40.051	1.0013	1.0030
50	50.087	1.0017	1.0042
60	60.137	1.0023	1.0050
70	70.210	1.0030	1.0072
80	80.282	1.0035	1.0080
00	90.381	1.0042	1.0109
100	100.500	1.0050	1.0130
110	110.641	1.0058	1.0153
120	120.806	1.0007	1.0177
130	130.007	1.0070	1.0204
140	141.215	1.0087	1.0232
150	151.462	1.0007	1.0202
160	101.741	1.0109	1.0294
170	172.052	1.0121	1.0328
180	182.308	1.0133	1.0304
190	102.770	1.0140	1.0401
200	203 200	1.0160	1.0440
210	213.660	1.0174	1.0481
220	224.102	1.0189	1.0524
230	234.708	1.0204	1.0568

261. *Chaleur spécifique des gaz.* La chaleur spécifique d'un gaz n'est pas la même, suivant que ce gaz, en changeant de température, peut changer de volume, de manière à rester à une pression constante, ou suivant qu'il conserve le même volume malgré la variation de température, qui change alors sa force élastique.

***TABLEAU** des chaleurs spécifiques de quelques gaz sous une même pression constante*, d'après MM. Laroche et Bérard.

DÉSIGNATION DES GAZ.	CHALEURS SPÉCIFIQUES, celle de l'air étant 1,		CHALEURS spécifiques, celle de l'eau étant 1, à poids égaux.
	à volumes égaux.	à poids égaux.	
Air atmosphérique.	1.0000	1.0000	0.2060
Hydrogène.	0.9033	12.5401	3.2930
Oxygène.	0.0705	0.8848	0.2361
Azote	1.0000	1.0318	0.2754
Oxyde de carbone.	1 0340	1.0805	0.2884
Acide carbonique.	1.2588	0.8280	0.2210
Oxyde d'azote.	1.3503	0.8878	0.2309
Gaz oléfiant.	1.5530	1.5763	0.4207
Vapeur d'eau.	1.0000	3.1360	0.8470

TABLEAU des chaleurs spécifiques de quelques gaz, à volume constant, celle de l'air étant égale à 1, et des rapports des chaleurs spécifiques à pression constante aux chaleurs spécifiques à volume constant, d'après les expériences de Dulong.

DÉSIGNATION DES GAZ.	CHALEURS spécifiques.	RAPPORTS.
Air atmosphérique	1.000	1.421
Hydrogène	1.000	1.407
Oxygène	1.000	1.415
Oxyde de carbone	1.000	1.427
Oxyde d'azote	1.227	1.343
Acide carbonique	1.249	1.338
Gaz oléfiant	1.754	1.240

Ce tableau fait voir que la chaleur spécifique à volume constant est la même pour les gaz simples, et que de plus elle est égale à celle de l'air; mais qu'elle est différente pour les gaz composés.

CHALEUR LATENTE.

262. *Chaleur latente de liquidité.* Lorsqu'un solide se liquéfie, il absorbe une grande quantité de chaleur sans que sa température augmente; cette quantité de chaleur prend le nom de *calorique de liquidité* ou de *chaleur latente de liquidité.*

TABLEAU de la chaleur latente de liquidité de quelques solides.

DÉSIGNATION DES SOLIDES.	TEMPÉRATURE de fusion.	CALORIQUE de liquidité en unités de chaleur (250).
Glace à 0°	0°	75
Sperma ceti	56	82.22
Cire d'abeilles	60	97.22
Étain	219	277.77

Les corps, en passant de l'état liquide à l'état solide, dégagent la même quantité de chaleur qu'ils ont absorbée en se liquéfiant, et leur température reste constante tant qu'il y a du liquide à solidifier.

263. *Chaleur latente de vaporisation.* Lorsqu'on vaporise un liquide, il absorbe une très-grande quantité de chaleur, et sa température, qui est aussi celle de la vapeur, reste constante tant qu'il y a du liquide à vaporiser; cette quantité de chaleur absorbée prend le nom de *calorique de vaporisation* ou de *chaleur latente de vaporisation.*

TABLEAU de la chaleur latente de vaporisation de quelques liquides, et de la quantité totale de chaleur absorbée pour amener un kilogramme de ces liquides de 0° à la température d'ébullition et le vaporiser, d'après M. Despretz.

DÉSIGNATION DES LIQUIDES.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale absorbée, en unités de chaleur.
Eau.	531	631
Alcool.	207	255
Éther sulfurique.	96.8	109.3
Essence de térébenthine.	76.8	149.2

Les physiciens ne sont pas d'accord dans l'évaluation de la chaleur latente de vaporisation de l'eau : Rumfort la suppose égale à 537; Dulong, à 543; Clément Desormes, à 550; M. Southern, à 530, et Watt, à 527.

D'après M. Southern, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est constante, de sorte que la quantité de chaleur totale contenue dans la vapeur croît avec la température; ainsi un kilogramme de vapeur à 135° contient 530 + 135 unités de chaleur. D'après Clément Desormes, au contraire, la quantité totale de chaleur absorbée pour échauffer et vaporiser un kilogramme d'eau à 0° est toujours de 650 unités quelle que soit la température de la vapeur; ainsi, à 135°, la chaleur latente de la vapeur est 650 — 135 = 515 unités.

Des expériences faites par M. Pambour tendent à confirmer la loi de Clément Desormes, qui aurait cependant besoin d'être confirmée dans des limites de pression plus étendues, pour qu'on pût la regarder comme générale, ce que l'on supposait cependant en pratique.

M. Regnault vient de faire des expériences pour déterminer la chaleur latente de la vapeur d'eau. Ses résultats sont représentés d'une manière satisfaisante par la formule :

$$L = A + BT,$$

L chaleur totale en unités (259), renfermée dans un kilogramme de vapeur saturée à la température T°;
A = 606,5 et B = 0,305 quantités constantes, déterminées pour deux observations où la température T était 100° et 195°.

La formule précédente peut donc s'écrire :

$$L = 606{,}5 + 0{,}305T.$$

Cette formule fait voir que la chaleur totale renfermée dans un kilogramme de vapeur saturée à T° est égale à la quantité de chaleur qu'un kilogramme de vapeur saturée à 0° abandonne en passant à l'état d'eau liquide à 0°, augmentée du produit 0,305T.

La fraction 0,305 est donc une *capacité calorifique particulière* de la vapeur d'eau, différente des capacités calorifiques des gaz à volume constant, ou à pression constante, mais en relation intime avec ces dernières (261). C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un kilog. de vapeur saturée, pour élever sa température de 1°, lorsque l'on comprime en même temps cette vapeur de manière à la maintenir à l'état de saturation.

C'est à l'aide de cette formule que les chaleurs totales du tableau suivant ont été calculées. De ces chaleurs totales, retranchant les nombres Q d'unités de chaleur absorbées pour porter l'eau de 0° à T° (page 329), on a les chaleurs latentes de vaporisation *l*, consignées dans la dernière colonne de la table.

TEMPÉRATURE de la vapeur saturée T.	CHALEUR totale L	CHALEUR latente *l*.	TEMPÉRATURE de la vapeur saturée T.	CHALEUR totale L	CHALEUR latente *l*.
0°	606.5	606.5	120°	643.1	522.3
10	609.5	599.5	130	646.1	515.1
20	612.6	592.6	140	649.2	508.0
30	615.7	585.7	150	652.2	500.7
40	618.7	578.7	160	655.3	493.6
50	621.7	571.6	170	658.3	486.2
60	624.8	564.7	180	661.4	479.0
70	627.8	557.6	190	664.4	471.6
80	630.9	550.6	200	667.5	464.3
90	633.9	543.5	210	670.5	456.8
100	637.0	536.5	220	673.6	449.4
110	640.0	529.4	230	676.6	441.9

264. ***TABLEAU** des températures d'ébullition de quelques matières, sous la pression atmosphérique.*

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades.	DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades.
Eau	100.0	Diss. sat. de tartre	116.7
Éther sulfurique	37.8	*Id.* de nitrate d'ammon.	125.3
Sulfure de carbone	47.0	*Id.* de sous-carbonate de potasse	140.0
Alcool	78.4	Essence de térébenthine	157.0
Diss. sat. de sulfate de soude	100.7	Phosphore	290.0
Id. d'acétate de plomb	102.0	Soufre	299.0
Id. de chlorure de sodium	106.9	Acide sulfurique	310.0
Id. de chlorhydrate d'ammoniaque	114.4	Huile de lin	316.0
Id. de nitre	115.6	Mercure	360.0

VAPEURS.

265. *Propriétés de la vapeur.* La vapeur non saturée se comporte comme un gaz, quand on fait varier sa température et son volume dans les limites qui ne l'amènent pas à saturation (255 et 256).

La vapeur saturée, c'est-à-dire celle qui est au maximum de tension et de densité correspondant à la température à laquelle elle se trouve, n'étant pas en contact avec du liquide, si on augmente son volume, on diminue sa densité, sa tension et sa température; si au contraire on diminue son volume, on augmente sa densité, sa tension et sa température, et il est probable qu'il y a de la vapeur condensée; cela suppose qu'il n'y a ni gain ni perte de chaleur par l'enveloppe qui renferme la vapeur. D'après Clément Desormes et M. Pambour, il n'y aurait pas condensation, et la vapeur resterait toujours saturée quoiqu'on augmentât ou qu'on diminuât son volume (263).

La vapeur en contact avec le liquide qui la forme est toujours saturée au maximum de densité et de pression correspondant à la température du liquide; il y a vaporisation ou condensation suivant qu'on augmente ou qu'on diminue son volume, et, par suite, absorption ou production de chaleur; ce qui diminue ou augmente la température du liquide, quand, toutefois, il n'y a ni gain ni perte de chaleur par l'enveloppe.

266. *Relation entre la température et la force élastique de la vapeur d'eau.* Tredgold a donné une formule empirique qui lie la température à la force élastique de la vapeur d'eau, pour des pressions qui ne dépassent pas une atmosphère, et qui est encore plus exacte que toute autre pour des pressions comprises entre 1 et 4 atmosphères; cette formule est

$$t = 85\sqrt[6]{p} - 75, \quad \text{d'où} \quad p = \left(\frac{t+75}{85}\right)^6,$$

t température de la vapeur, en degrés centigrades;
p force élastique de la vapeur, en centimètres de mercure.

Avant 1830, on ne connaissait la force élastique de la vapeur que pour des températures ne s'élevant pas au-dessus de 172°.13, ce qui correspond à 8 atmosphères de pression; mais à cette époque, MM. Dulong et Arago poussèrent les expériences jusqu'à la température de 224°.20, qui correspond à une force élastique de 24 atmosphères. Les résultats de ces expériences sont consignés dans le tableau suivant, dont les nombres correspondant à des pressions de plus de 24 atmosphères ont été déterminés au moyen de la formule empirique suivante, que ces savants ont posée pour relier les résultats de leurs expé-

riences. C'est à M. Gay-Lussac que sont dus les résultats correspondant à des températures inférieures à 100°.

$$t = \frac{\sqrt[5]{p}-1}{0.7153} \quad \text{d'où} \quad p = (1+0.7153t)^5.$$

p force élastique de la vapeur, en atmosphères ;

t température en unités de 100° centigrades ; la valeur de t, tirée de la formule, est positive ou négative, suivant que la température de la vapeur est supérieure ou inférieure à 100° : ainsi la température de la vapeur étant 100°, la formule donne $t=0$; si la température est 140°, on a $t=0.40$, et si elle est 60°, on a $t=-0.40$.

t exprimant la température en degrés centigrades à partir de 0°, et p la force élastique de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré, la formule précédente devient

$$t = 138,883\sqrt[5]{p} - 39,802\text{, d'où } p = (0.28658 + 0.0072003t)^5.$$

***TABLEAU** donnant la tension de la vapeur d'eau à différentes températures, sa pression sur un centimètre carré en kilogrammes, sa densité, celle de l'eau étant 1, et le volume de 1 kilogramme de vapeur.*

TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	TENSION en centimètres de mercure.	TENSION en atmosphères.	PRESSION en kilogrammes.	DENSITÉ celle de l'eau liquide à 0° étant 1.	VOLUME en litres.
—20°	0.1333	»	0.0018	0.000 001 54	650588
—15	0.1879	»	0.0026	0.000 002 12	470898
—10	0.2631	»	0.0036	0.000 002 92	342984
— 5	0.3660	»	0.0050	0.000 003 98	251358
0	9.5059	»	0.0069	0.000 005 40	182323
5	0.6947	»	0.0094	0.000 007 27	137488
10	0.9475	»	0.0129	0.000 009 74	102670
12	1.0707	0.0141	9.0146	0.000 010 92	91564
15	1.2837	»	0.0170	0.000 012 99	77008
20	1.7314	»	0.0235	0.000 017 18	58224
25	2.3090	»	0.0314	0.000 022 52	44411
30	3.0643	»	0.0418	0.000 029 38	34041
35	4.0404	»	0.0549	0.000 038 09	26253
38	4.7579	0.0626	0.0646	0.000 044 42	22513
40	5.2908	»	0.0720	0.000 049 16	20347
45	6.8751	»	0.09340	0.000 062 74	15938
50	8.8742	»	0.12056	0.000 079 70	12546
51	9.3301	0.123	0.12676	0.000 083 54	11971
55	11.3710	»	0.15449	0.000 100 54	9946
60	14.4660	»	0.19653	0.000 125 98	7937
65	18.2719	»	0.24823	0.000 156 68	6382
66	19.1270	0.252	0.25086	0.000 163 56	6114
70	22.9070	»	0.31121	0.000 193 55	5167
75	28.507	»	9.39632	0.000 237 89	4204
80	35.208	»	0.47834	0.000 288 89	3462
82	38.238	0.503	0.51950	0.000 311 95	3206
85	43.171	»	0.58652	0.000 349 16	2864
90	52.528	»	0.71364	0.000 418 91	2387
92	56.695	0.746	0.77026	0.000 449 56	2224
95	63.427	»	0.86172	0.000 408 86	2005

TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	TENSION en centimetres de mercure.	TENSION en atmospheres.	PRESSION en kilogrammes.	DENSITÉ celle de l'eau liquide à 0° étant 1.	VOLUME en litres.
100°	76.000	1.00	1.03253	0.000 589 55	1096
106.60	95.000	1.25	1.20067	0.000 723 01	1381
112.40	114.000	1.50	1.54880	0.000 855 39	1160
117.10	133.000	1.75	1.80604	0.000 083 24	1014
121.55	152.000	2.00	2.06507	0 001 116 52	896
125.50	171.000	2.25	2.32320	0.001 232 03	806
128.85	190.000	2.50	2.58134	0.001 360 36	732
132.15	209.000	2.75	2.83047	0.001 490 56	671
135.00	228.000	3.00	3.00760	0 001 614 53	610
137.70	247.000	3.25	3.35573	0.001 737 30	576
140.35	260.000	3.50	3.61387	0.001 858 86	538
142.70	285.000	3.75	3.87200	0.001 980 20	505
144.05	304.000	4.00	4.13013	0.002 100 67	470
146.76	323.000	4.25	4.38827	0.002 227 31	440
149.15	342.000	4.50	4.64040	0.002 339 38	428
151.15	361.000	4.75	4.90453	0.002 457 03	407
153.30	380.000	5.00	5.16267	0.002 573 63	380
155.00	309.000	5.25	5 42080	0.002 680 56	302
156.70	418.000	5.50	5.67803	0.002 808 27	356
158.30	437.000	5,75	0.03707	0.002 924 85	342
160.00	456.000	6,00	6.19520	0.003 046 51	328
161.54	475.000	6,25	6.45334	0.003 155 13	317
163.25	494.000	6,50	6.71140	0.003 208 28	306
164.84	513.000	6,75	6.96960	0.003 381 48	296
166.42	532.000	7.00	7.22773	0.003 403 93	286
167.04	551.000	7,25	7.48587	0.003 606 06	277
160.41	570.000	7.50	7.74400	0.003 717 83	260
170.78	589.000	7.75	8.00213	0.003 820 07	261
172.13	608.000	8.00	8.26026	0.003 941 10	254
173.46	627.000	8.25	8.51840	0.004 051 08	247
174.70	046.000	8.50	8.77053	0.004 161 23	240
176.11	665.000	8.75	0.03467	0.004 271 82	234
177.40	684.000	9.00	0.20280	0.004 381 11	228
178.68	703.000	9.25	0.55093	0 004 479 55	223
170.89	722 000	0 50	0.80006	0.004 508 73	217
180.05	741.000	9.75	10.00720	0.004 738 58	212
182.00	760.000	10.00	10.32533	0.004 816 00	208
186.03	836.000	11.00	11.35786	0.005 255 7	190
190.00	912.000	12.00	12.30040	0.005 683 4	176
193.70	988.000	13.00	13.42292	0.000 107	104
197.19	1064.000	14.00	14.45346	0.006 527	153
200.48	1140.000	15.00	15.48800	0.000 944	144
203.60	1216.000	16.00	16.52052	0.007 350	136
206.57	1292.000	17.00	17.55306	0.007 769	120
209.40	1368.000	18.00	18.58560	0.008 178	122
212.10	1444.000	19.00	10.61812	0.008 583	117
214.70	15.0.000	20.00	20.65066	0.008 080	111
217.20	1596.000	21.00	21.68310	0.009 387	107
219.00	1672.000	22.00	22.71572	0.009 785	102
221.00	1748.000	23.00	23.71820	0.010 182	08
224.20	1824.000	24.00	24.78080	0.010 575	95
22[illegible].30	1900.000	25.00	25.81332	0.010 968	91
230.20	2280.000	30.00	30.07000	0.012 003	78
244.85	2660.000	35.00	36.13804	0.014 663	68
252.55	3040.000	40.00	41.30133	0.016 644	60
259.52	3420.000	45.00	46.40398	0.018 407	54
265.80	3800.000	50.00	51.62864	0.020 306	49

D'après le tableau précédent, on voit que, sous la pression atmosphérique $0^m,76$, un kilogramme ou un litre d'eau produit 1696 litres de vapeur, ou à peu près 1700 litres.

M. Regnault vient encore de faire des expériences pour déterminer la force élastique de la vapeur aux températures de $-32°$ à $+230°$. Les résultats qu'il a obtenus sont représentés avec beaucoup d'exactitude par les formules d'interpolation suivantes :

1° Pour les températures de $-32°$ à $0°$,

$$F = a + b\alpha^x. \qquad (a)$$

F force élastique, en millimètres de mercure;
$a = -0.08038$ quantité constante;
b constante, $\log b = \bar{1}.6024724$;
α constante, $\log \alpha = 0.0333980$;
$x = t + 32$, t étant la température de la vapeur indiquée par le thermomètre à air en degrés centigrades, t est négatif;

2° Pour les températures de $0°$ à $100°$,

$$\log F = a + b\alpha_1{}^t - c\beta_1{}^t, \qquad (b)$$

$$a = 4.7384380, \quad \log b = \bar{2}.1340339, \quad \log c = 0.6116485,$$

$$\log \alpha_1 = 0.006865036, \quad \log \beta_1 = \bar{1}.9967249;$$

3° Pour les températures de $100°$ à $230°$,

$$\log F = a - b\alpha_1{}^x - c\beta_1{}^x, \qquad (c)$$

$$a = 6.2640348, \quad \log b = 0.1397743, \quad \log c = 0.6924351,$$

$$\log \alpha_1 = \bar{1}.994049292, \quad \log \beta_1 = \bar{1}.998343862;$$

$x = T + 20$, T étant la température en degrés centigrades, comptée à partir de la glace fondante.

C'est en faisant usage de ces formules que l'on a calculé, dans la limite relative à chacune d'elles, les résultats du tableau suivant, où F est exprimé en centimètres. On aurait pu calculer ce tableau dans toute son étendue avec la formule unique (c) : on aurait obtenu des valeurs pour ainsi dire identiques à celles qui ont été calculées avec la formule (b) entre $40°$ et $100°$; mais dans les températures plus basses les forces élastiques données par la formule (c) seraient un peu trop faibles.

TABLE des forces élastiques de la vapeur d'eau à différentes températures, d'après les expériences de M. Regnault.

TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES en		TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES en		TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES en	
	centimètres.	atmosphères.		centimètres.	atmosphères.		centimètres.	atmosphères.
—32°	0.9329		+18°	1.5357		+98°	21.3590	
31	9.9352		19	1.9349		99	22.3165	
30	9.9386		20	1.7391	0.023	79	23.3093	0.309
29	0.9424		21	1.8495		71	24.3393	
28	9.9464		22	1.9059		72	25.4073	
27	9.9598		23	2.0888		73	26.5147	
20	9.0555		24	2.2184		74	27.6624	
25	0.0605		25	2.3559		75	28.8517	
24	9.9999		29	2.4988		76	30.0838	
23	0.0719		27	2.5505		77	31.3609	
22	9.0783		28	2.8101		78	32.6811	
21	9.9853		29	2.9782		79	34.9488	
20	0.9927		30	3 1548	0.042	80	35.4643	9.490
19	9.1998		31	3.3409		81	39.9287	
18	0.1095		32	3 5359		82	38.4435	
17	9.1189		33	3.7411		83	40.9191	
16	9.1299		34	3.9565		84	41.6208	
15	9.1409		35	4.1827		85	43.3941	
14	0.1518		36	4.4291		80	43.9344	
13	9.1649		37	4.0691		87	49.8221	
12	9.1783		38	4.9302		88	48.0687	
11	0.1933		39	5.2039		89	59.5759	
19	9.2993		40	5.4909	0.072	90	51.5459	0.691
9	9.2297		41	5.7910		91	54.5778	
8	9.2455		42	9.1055		92	59.9757	
7	9.2958		43	9.4349		93	58.8409	
6	0.2879		44	6.7799		94	01.9740	
5	9.3113		45	7.1391		95	63.3778	
4	9.3368		49	7.5158		99	65.7535	
3	9.3944		47	7.9093		97	98.2029	
2	9.3941		48	8.3204		98	79.7280	
1	0.4293		49	8.7499		99	73.3395	
0	9.4600	9.000	50	9.1982	0.121	100	79.0909	1.000
+ 1	0.4940		51	9.0661		101	78.7599	
2	9 5302		52	19.1543		192	81.6910	
3	0.5687		53	19.0636		103	84.5289	
4	9.9097		54	11.1945		104	87.5419	
5	0.9534		55	11.7478		105	90.6419	
6	9.9998		59	12.3244		196	93.8319	1.235
7	9.7492		57	12.9251		107	97.1140	
8	9.8917		58	13.5505		108	109.4919	
9	0.8574		59	14.2015		199	193.965	
19	0.9195	0.012	99	14.8791	9.196	119	107.537	1.415
11	9.9792		61	15.5839		111	111.299	
12	1.9457		62	19.3170		112	114.983	1.513
13	1.1192		93	17.0791		113	118.891	
14	1.1908		94	17.8714		114	122.847	
15	1.2699		95	18.6945		115	129.941	
16	1.3536		66	19.5496		116	131.147	
17	1.4421		67	29.4370		117	135.466	

TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES en centimètres.	FORCES ÉLASTIQUES en atmosphères.	TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES en centimètres.	FORCES ÉLASTIQUES en atmosphères.	TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES en centimètres.	FORCES ÉLASTIQUES en atmosphères.
+118°	139.002		+156°	410.659	5.522	+194°	1029.701	
110	144.455		157	430.668		105	1051.963	
120	140.128	1.962	158	441.945		196	1074.595	
121	153.025		159	453.436	5.066	197	1097.500	
122	158 847		160	465.162	6.120	198	1120.082	
123	163.806		161	477.128		100	1144.746	
124	160.076		162	480.336	6.430	200	1168.896	15.380
125	174.388		163	501.701		201	1193.437	
126	170.835		164	514.407		202	1218.360	
127	185.420		165	527.454	6.940	203	1243.700	
128	101.147	2.515	166	540.660		204	1269.430	
129	197.015		167	554 143		205	1295.566	
130	203.028	2.671	168	567.882	7.472	206	1322.112	
131	209.194		160	581.800		207	1340.075	
132	215.503		170	506.166	7.844	208	1376.453	
133	221.969		171	610.710	8.036	209	1404.252	
134	228.502	3.008	172	625.548		210	1432.480	18.848
135	235.373		173	640.660		211	1461.132	
136	242.316		174	656.055		212	1400.222	
137	249.423		175	671.743		213	1519.748	
138	256.700		176	687.722	9.049	214	1549.717	
130	264.144	3.476	177	703.097		215	1580.133	
140	271.763	3.576	178	720.572		216	1610.904	
141	279.557		170	737.452		217	1642.315	
142	287.530		180	754.639	9.029	218	1674.000	
143	205.686		181	772.137		210	1706.320	
144	304.026	4.000	182	789.952		220	1730.036	22.882
145	312.555		183	808.084		221	1772.213	
146	321.274		184	826.540		222	1805.864	
147	330 187		185	845.323		223	1839.994	
148	339.298	4.464	186	864.435		224	1874.607	
140	348.600		187	883.882		225	1009.704	
150	358.123	4.712	188	003.668		226	1045.292	
151	367.843		180	923.705		227	1081.376	
152	377.774	4.971	100	944.270	12.425	228	2017.061	
153	387.018		101	965.093		220	2055.048	
154	308.277		102	986.271		230	2092.640	27.535
155	408.856		193	1007.804				

267. *Relations entre la densité de la vapeur d'eau et celle de l'air.* On peut admettre, en pratique, que la densité de la vapeur d'eau, saturée ou non, est toujours les 5/8 de celle de l'air à la même température et à la même pression. Ainsi, sans faire usage du tableau (266), ayant la densité de l'air à 0° et sous la pression 0^{m}.76 (43), on déterminera sa densité à une température et à une pression quelconque (256), et en prenant les 5/8, on aura la densité de la vapeur d'eau à la même température et sous la même pression.

268. *Mélange des gaz et des vapeurs.* Lorsqu'un liquide est introduit

dans un espace limité rempli d'un gaz qui n'exerce aucune action chimique sur ce liquide, il se vaporise autant de liquide que si l'espace était vide, seulement la vaporisation est moins prompte. La force élastique de la vapeur formée est la même que si le gaz n'existait pas, et s'ajoute à celle de ce gaz; de sorte que la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la force élastique du gaz, augmentée de celle de la vapeur correspondant à la température du mélange (266). Il en est de même lorsqu'on introduit plusieurs gaz dans un même espace limité; la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques des différents gaz occupant séparément le même espace.

V étant le volume d'un gaz saturé de vapeur à la température $t°$, et P la pression du mélange, le tableau page 334 donne la tension p de la vapeur à $t°$, et $P - p$ est la force élastique du gaz. Ayant alors les volumes, les températures et les tensions du gaz et de la vapeur, on peut déterminer le poids de chacun de ces deux corps entrant dans le mélange.

269. *TABLEAU du poids de vapeur contenu dans un mètre cube d'air saturé à différentes températures, sous la pression atmosphérique* 0m.76.

TEMPÉRATURE en deg. cent.	POIDS en grammes.	TEMPÉRATURE en deg. cent.	POIDS en grammes.	TEMPÉRATURE en deg. cent.	POIDS en grammes.
0°	5.2	35°	37.00	70°	141.96
5	7.2	40	46.40	75	173.74
10	9.50	45	58.60	80	199.24
15	12.83	50	72.00	85	227.20
20	16.78	55	88.74	90	251.34
25	22.01	60	105.84	95	273.78
30	28.51	65	127.20	100	295.00

270. *Influence des matières dissoutes dans un liquide à vaporiser.* Dans un vase de verre, l'eau bout avec soubresauts, et l'ébullition n'a lieu, d'après M. Gay-Lussac, qu'à une température de 1°.3 plus élevée que dans un vase métallique. L'acide sulfurique présente le même phénomène, et les soubresauts sont d'autant plus violents que le liquide a plus de cohésion et qu'il exerce sur la matière du vase une action moléculaire plus grande. Quelques parcelles métalliques projetées dans le vase arrêtent les soubresauts, et la température devient celle que l'on obtiendrait dans un vase métallique.

Le point d'ébullition des liquides n'est pas changé par les corps étrangers qui n'y sont que mécaniquement mélangés, comme les particules de sable, de sulfate de chaux, de carbonate de chaux, etc.; mais il est toujours modifié par les matières chimiquement combinées

au liquide; ainsi tous les sels solubles retardent le point d'ébullition de l'eau, et l'expérience prouve :

1° Que la vapeur produite à la surface des dissolutions salines est de la vapeur d'eau pure;

2° Que la tension de la vapeur dans un espace limité et à une température donnée est moindre que celle de la vapeur produite par de l'eau pure, et qu'elle varie avec la nature du sel dissous;

3° que sous la pression $0^m.76$, la température de la vapeur formée est toujours de 100°, quelle que soit la nature du sel dissous et du vase contenant la dissolution.

TABLEAU des points d'ébullition de quelques dissolutions saturées, sous la pression $0^m.76$, d'après les expériences de M. Legrand.

DÉSIGNATION DES SELS DISSOUS.	TEMPÉRATURES d'ébullition, en degrés centigrades.	QUANTITÉS de sel qui saturent 100 d'eau.
Chlorate de potasse	104.2	61.5
Chlorure de barium	104.4	60.1
Carbonate de soude	104.6	48.5
Phosphate de soude	105.5	113.2
Chlorure de potassium	108.3	59.4
Chlorure de sodium	108.4	41.2
Hydrochlorate d'ammoniaque	114.2	88.9
Tartrate neutre de potasse	114.67	296.2
Nitrate de potasse	115.9	335.1
Chlorure de strontium	117.9	117.5
Nitrate de soude	121.0	224.8
Acétate de soude	124.37	209.0
Carbonate de potasse	135.0	205.0
Nitrate de chaux	151.0	362.2
Acétate de potasse	169.0	798.2
Chlorure de calcium	179.5	325.0
Nitrate d'ammoniaque	180.0	Infini

271. *Tension des vapeurs autres que la vapeur d'eau.* D'après Dalton, les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales à des températures également éloignées de celle de leur point d'ébullition sous la pression $0^m,76$, il sera facile, au moyen des tableaux pages 334 et 337, et de celui n° 264, qui donne la température d'ébullition de quelques liquides, d'avoir la force élastique de la vapeur de ces liquides à une température quelconque. Ainsi la force élastique de la vapeur d'alcool à $78°.4 + 20° = 98°.4$, sera la même que celle de la vapeur d'eau à $100° + 20° = 120°$; elle sera donc de 1.962 atmosphères (page 338).

LIQUÉFACTION DES GAZ.

272. *Liquéfaction des gaz.* On est déjà parvenu à liquéfier un grand nombre de gaz, et il est probable que tous pourraient l'être, s'il était possible de confectionner des vases d'une résistance suffisante.

TABLEAU des températures et des pressions de liquéfaction de quelques gaz.

DÉSIGNATION DES GAZ.	TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	PRESSION en atmosphères.	DÉSIGNATION DES GAZ.	TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	PRESSION en atmosphères.
Acide sulfureux. . .	+ 7	2	Acide chlorhydrique.	— 16	20
Cyanogène.	+ 7	3.6	*Id.* . .	— 4	25
Chlore.	+ 15.5	4	*Id.* . .	+ 10	40
Ammoniaque. . . .	0	5	Acide carbonique. .	— 11	20
Id. . . .	+ 10	6.50	*Id.* . .	0	36
Hydrogène sulfuré. .	— 16	14	Oxyde nitreux. . . .	0	44
Id. . . .	+ 10	17	*Id.*	+ 7	51

En se gazéifiant, l'acide carbonique liquide produit un froid d'environ 90° ; ce froid a permis à M. Thilorier de congeler l'acide carbonique même.

SOURCES DE FROID.

273. *TABLEAU du froid produit par quelques mélanges frigorifiques.*

DÉSIGNATION DES MÉLANGES.	ABAISSEMENT de température.	FROID produit.
Eau, 16 parties ; nitre, 5 ; hydrochlorate d'ammoniaque, 5.	de + 10° à — 12°	22°
Eau, 10 ; hydrochlorate d'ammoniaque, 5 ; nitre, 5 ; sulfate de soude, 8.	de + 10 à — 16	26
Eau, 1 ; nitrate d'ammoniaque, 1.	de + 10 à — 10	26
Eau, 1 ; nitrate d'ammoniaque, 1 ; sous-carbonate de soude, 1.	de + 10 à — 19	29
Eau, 4 ; chlorure de potassium, 57 ; chlorhydrate d'ammoniaque, 32 ; nitrate de potasse, 20. .	»	15
Neige ou glace pilée, 2 ; sel marin, 1.	»	20
Neige ou glace pilée, 5 ; sel marin, 2 ; sel ammoniaque, 1.	»	24
Neige ou glace pilée, 24 ; sel marin, 10 ; sel ammoniaque, 5 ; nitre, 5.	»	28
Neige ou glace pilée, 12 ; sel marin, 5 ; nitrate d'ammoniaque, 5.	»	31
Sulfate de soude, 3 ; acide azotique étendu, 2.	de + 10 à — 19	29
Sulfate de soude, 6 ; sel ammoniaque, 4 ; nitre, 2 ; acide azotique étendu, 4.	de + 10 à — 23	33
Sulfate de soude, 6 ; nitrate d'ammoniaque, 5 ; acide azotique étendu, 4.	de + 10 à — 20	36
Phosphate de soude, 9 ; acide azotique étendu, 4.	de + 10 a — 29	39
Sulfate de soude, 20 ; acide sulfurique à 36°, 16.	de + 10 à — 8.15	18.15
Sulfate de soude, 22 ; résidu d'éther à 33°, 17.	de + 10 à — 8	18
Sulfate de soude, 8 ; acide chlorhydrique, 5. .	de + 10 à — 17	27

274. *TABLEAU des abaissements de température obtenus par M. Gay-Lussac, en faisant arriver un courant d'air desséché au chlorure de calcium sur un thermomètre dont la boule était recouverte d'une batiste humide.*

TEMPÉRATURES de l'air sec.	ABAISSEMENTS de température.	TEMPÉRATURES de l'air sec.	ABAISSEMENTS de température.	TEMPÉRATURES de l'air sec.	ABAISSEMENTS de température.
0°	5°82	9°	8°61	18°	11°96
1	6.09	10	8.97	19	12.34
2	6.37	11	9.37	20	12.73
3	6.66	12	9.70	21	13.12
4	6.96	13	10.07	22	13.51
5	7.27	14	10.44	23	13.90
6	7.59	15	10.82	24	14.30
7	7.92	16	11.20	25	14.70
8	8.26	17	11.58		

PUISSANCES CALORIFIQUES DES COMBUSTIBLES.

275. On appelle *puissance calorifique d'un combustible*, la quantité de chaleur que dégage, en se brûlant complétement, 1 kilogramme de ce combustible. La puissance calorifique d'un même combustible est constante, quelles que soient d'ailleurs les circonstances dans lesquelles s'opère la combustion.

TABLEAU des puissances calorifiques de quelques matières combustibles, en unités de chaleur (259). (Extraits du traité de la chaleur considérée dans ses applications, de M. PECLET).

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	NOMS des opérateurs.	PUISSANCES calorifiques.
Carbone pur.	Despretz.	7800
Hydrogène pur.	Laplace.	23400
Id.	Clément.	22115
Id.	Despretz.	23640
Hydrogène protocarboné.	Dalton.	6375
Hydrogène bicarboné.	*id.*	6600
Oxyde de carbone.	*id.*	1857
Huile d'olive.	Rumfort.	9044
Id.	Lavoisier.	11196
Huile de colza épurée.	Rumfort.	9307
Éther sulfurique, *densité* = 0.728 à 20°.	*id.*	8030
Alcool à 42° (à 15°.5 de température).	*id.*	6195
Id. à 35° (*id.*)	*id.*	5261
Suif.	*id.*	8639
Id.	Laplace.	7186
Naphte, *densité* = 0.827.	Rumfort.	7338
Phosphore.	Laplace.	7500
Essence de térébenthine.	Dalton.	4500
Cire blanche.	Rumfort.	9679
Id.	Laplace.	10500

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	PUISSANCES calorifiques.
D'après les dernières expériences de Dulong :	
Hydrogène	34742
Carbone passant seulement à l'état d'oxyde	1386
Pour le poids d'oxyde de carbone renfermant 1 kilog. de carbone	5784
Carbone passant à l'état d'acide carbonique	7170
Oxyde de carbone	2488
Hydrogène protocarboné	13205
Hydrogène bicarboné	12032
Soufre	2601
Éther sulfurique	9430
Essence de térébenthine	10836
Huile d'olive	9862
Alcool	6855

Pendant longtemps on a admis que la puissance calorifique d'un combustible était proportionnelle à la quantité d'oxygène nécessaire à sa combustion; c'est ce que semblaient confirmer les puissances calorifiques du carbone et de l'hydrogène, obtenues par M. Despretz; mais cette loi est démentie par les dernières expériences de Dulong, qui ont donné pour le carbone et l'hydrogène des puissances calorifiques qui sont loin d'être dans le rapport des quantités d'oxygène absorbées.

TABLEAU des puissances calorifiques des combustibles généralement employés dans l'industrie, et des quantités de chaleur que rayonnent ces combustibles en brûlant, en supposant leurs puissances calorifiques égales à l'unité.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	PUISSANCES calorifiques.	POUVOIRS rayonnants.
Bois desséché à 100°	3600	0.28
Bois ordinaire à 0.20 d'eau	2800	0.25
Charbon de bois	7000	0.50
Tourbe desséchée à 60°	4800	0.25
Tourbe à 0.20 d'eau	3600	0.25
Charbon de tourbe	5800	0.50
Houille moyenne	7500	0.55
Coke à 0.15 de cendre	6000	

TABLEAU des quantités de chaleur moyennes produites par une mesure de volume de quelques combustibles. Ces quantités de chaleur ont été obtenues en multipliant les puissances calorifiques des combustibles par le poids en kilogrammes de leur mesure de volume.

DÉSIGNATION DES MESURES.	DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	CHALEUR produite en unités.
1 hectolitre.	Houille de moyenne qualité. . . .	630000
1 corde de 4 mètres cubes. . .	Noyer d'une année de coupe. . . .	7742000
Id. . . .	Chêne blanc d'une année de coupe.	6846000
Id. . . .	Frêne *id.*	5074000
Id. . . .	Hêtre *id.*	5603000
Id. . . .	Orme *id.*	4487000
Id. . . .	Bouleau *id.*	4102000
Id. . . .	Châtaignier *id.*	4035000
Id. . . .	Charme *id.*	5572000
Id. . . .	Pin d'une année de coupe.	4263000
Id. . . .	Peuplier d'Italie *id.*	3069000
1 hectolitre.	Charbon de noyer.	292000
Id.	*Id.* de chêne.	255000
Id.	*Id.* de frêne.	210000
Id.	*Id.* de hêtre.	176000
Id.	*Id.* d'orme.	167000
Id.	*Id.* de bouleau.	153000
Id.	*Id.* de châtaignier.	146000
Id.	*Id.* de charme.	176000
Id.	*Id.* de pin.	160000
Id.	*Id.* de peuplier d'Italie. . . .	109000
1 hectolitre comble.	Coke.	230000
1 corde pesant 2000 kilog. . .	Tourbe de Beauvais, 2e qualité. . .	7200000

COMBUSTIBLES.

276. *Combustibles.* Les combustibles le plus généralement employés dans l'industrie sont le bois, le charbon de bois, la tannée, la tourbe, le charbon de tourbe, la houille et le coke.

Le carbone et l'hydrogène sont les deux principaux éléments utiles qui composent les combustibles.

C'est vers la température de 500° que les combustibles commencent à brûler en donnant de la lumière (252).

277. *Bois.* Le bois est formé : 1° d'une matière que M. Payen appelle cellulose, qui constitue la charpente solide de toutes les plantes, et qui se compose de 0.444 de carbone, et de 0.556 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions convenables pour faire de l'eau ; 2° d'une matière incrustante de composition variable avec la nature des bois, très-riche en carbone, et contenant un petit excès d'hydrogène sur la quantité nécessaire à la composition de l'eau. Le bois contient en outre moyennement 0.015 de matières étrangères qui donnent naissance aux

cendres lors de la combustion : les bois de chauffage ordinaires contiennent à peu près 0.02 de ces matières étrangères.

Le bois vert contient de 0.37 à 0.48 d'eau, qu'il peut perdre sans que sa nature soit altérée; celui de 4 à 5 mois de coupe, employé au charbonnage, en contient de 0.30 à 0.35, et celui de chauffage de 8 à 12 mois de coupe, de 0.20 à 0.25.

Il faut éviter de faire la coupe des bois lorsqu'ils sont en pleine sève; ainsi la saison d'hiver doit être choisie pour l'effectuer. On peut considérer quinze à vingt ans comme l'âge du bois à charbon, vingt-cinq à trente ans comme celui du bois à brûler, et cent ans et au-dessus comme celui du bois d'œuvre.

La France produit annuellement, d'après MM. Héron de Villefosse, 9 804 928 cordes, de chacune 2.75 stères, de bois de chauffage; ce qui équivaut à 84 163 426 francs.

D'après les expériences de Rumfort et celles de quelques autres opérateurs, on peut admettre que la puissance calorifique du bois que l'on a privé d'eau en le desséchant préalablement à 100°. est 3600$^{un.}$, et celle du bois ordinaire à brûler, contenant de 20 à 25 pour 100 d'eau, 2750$^{un.}$ en moyenne. La puissance calorifique paraît être la même pour tous les bois desséchés au même degré.

D'après M. Péclet, la quantité de chaleur rayonnée par le bois de hêtre en petits morceaux est à la quantité de chaleur entraînée par la fumée dans le rapport de 1 à 2.5, et par suite, à la quantité totale de chaleur développée, dans celui de 1 à 3.5; ces rapports sont beaucoup plus grands pour les bois en gros morceaux donnant des charbons volumineux très-rayonnants (page 343).

M. Péclet a reconnu aussi, que le pouvoir rayonnant était variable pour les différents bois en morceaux ordinaires, mais qu'il était à peu près le même pour tous les bois en petits morceaux.

TABLEAU des poids du mètre cube de différents bois,
d'après M. Berthier.

DÉSIGNATION DES BOIS.	ÉTAT DES BOIS.	POIDS en kilogram.
Chêne de futaie des environs de Moulins.	Coupé depuis un an, en bûches refendues.	275
Id. *id.*	*Id.*, scié en quatre. . . .	515
Chêne de la forêt de Monadier, près Moulins.	Gros bois coupé depuis 3 ans, refendu.	386
Id. *id.*	*Id.*, scié en quatre. . . .	485
Chêne des environs de Cahors.	Coupé depuis un an.	525
Chêne de charbonnage.	Même, long de 30 pouces. . . .	220 à 262
Hêtre des environs de Moulins.	En gros rondins refendus. . . .	400
Id. *id*	Vermoulu en partie.	375
Bouleau des environs de Moulins.	En gros rondins.	440
Tremble.	De charbonnage.	190 à 220
Sapin de Moulins.	En gros bois.	300 à 340
Orme.	. . . .	320
Charme.	. . . .	398

A Paris, le bois de chauffage ordinaire pèse de 700 à 750 kilog. la voie, et celui de charbonnage de 600 à 700 kilog. La voie est de 2 stères ou 2 mètres cubes. Les bûches ayant $1^{m}.14$ de longueur, la mesure employée dans les chantiers pour livrer le stère a $1^{m}.00$ de longueur sur $0^{m}.88$ de hauteur.

Dans les arts, les effets des bois ne sont pas toujours proportionnels à leur puissance calorifique; ainsi, par exemple, s'il s'agit d'évaporer de l'eau dans une chaudière, ceux qui brûlent avec flamme sont les plus avantageux. Sous ce rapport, les différents bois sont rangés dans l'ordre suivant :

Sycomore.	100	Mélèze et orme. . .	72	Tilleul.	55
Pin sylvestre.	89	Chêne blanc.	70	Tremble.	51
Hêtre et frêne. . . .	87	Bouleau.	68	Aulne.	46
Charme.	85	Sapin.	63	Saule.	40
Alisier.	82	Acacia.	59	Peuplier d'Italie. . .	39
Chêne-rouvre. . . .	75				

***TABLEAU** des poids, des compositions en carbone et en hydrogène, et des puissances calorifiques du stère de différents bois secs, d'après les expériences récentes de M. Chevandier.*

NATURE DES BOIS.	Poids d'un stère de bois sec.	Charbon contenu dans un stère.	Hydrogène libre contenu dans un stère.	Puissance calorifique d'un stère.	Puissance calorifique relative.
	kilog.	kilog.	kilog		
Chêne à glands sessiles (bois de quartiers).	380	188.49	2.61	1 614319	1.0000
Hêtre (bois de quartiers).	380	187.20	2.64	1 604824	0.9941
Chêne, les deux variétés confondues (bois de quartiers).	371	184.02	2.55	1 576101	0.9763
Charme (bois de quartiers).	370	179.73	2.28	1 532082	0.9490
Chêne à glands pédonculés (bois de quartiers)	359	178.07	2.47	1 525225	0.9448
Bouleau (bois de quartiers).	338	171.92	3.65	1 516271	0.9392
Charme (quartiers et rondins mêlés). . .	361	175.35	2.23	1 494938	0.9260
Bouleau (quartiers et rondins mêlés) . .	332	168.87	3.58	1 489190	0.9224
Id. (rondinage de brins).	318	161.75	3.43	1 426434	0.8836
Sapin, *id.*	312	158.89	2.94	1 386370	0.8587
Chêne, les deux variétés confondues (rondinage de brins).	317	157.24	2.18	1 346772	0.8342
Hêtre (rondinage de brins)	314	154.68	2.18	1 326072	0.8214
Aune (bois de quartiers).	293	140.52	2.98	1 311993	0.8127
Aune (quartiers et rondins mêlés).. . .	291	148.50	2.96	1 303054	0.8071
Charme (rondinage de brins)	313	152.04	1.94	1 296432	0.8030
Hêtre (rondinage de branches).	304	149.76	2.11	1 283870	0.7953
Sapin, *id.*	287	146.15	2.70	1 275068	0.7898
Aune (rondinage de brins).	283	144.41	2.88	1 267217	0.7849
Pin, *id.*	283	144.66	2.63	1 260600	0.7808
Pin (rondinage de branches).	281	143.63	2.61	1 251581	0.7752
Charme, *id.*	298	144.75	1.84	1 234029	0.7644
Sapin (bois de quartiers)..	277	141.06	2.61	1 230800	0.7624
Saule (quartiers et rondins mêlés). . . .	285	142.28	2.14	1 224424	0.7584
Bouleau (rondinage de branches). . . .	269	136.82	2 90	1 206536	0.7473
Saule (rondinage de brins)..	276	137.79	2.07	1 185698	0.7344
Tremble (quartiers et rondins mêlés). . .	273	134.56	2.57	1 176858	0.7290
Chêne, les deux variétés confondues (rondinage de branches).	277	137.40	1.90	1 176671	0.7288
Pin (bois de quartiers).	256	130.86	2.38	1 140375	0.7064

TABLEAU des quantités d'eau hygrométrique contenues dans 100 de bois de différentes essences et de diverses qualités, 6 mois, 1 an, 18 mois et 2 ans après la coupe, d'après M. Chevandier.

BOIS.	BOIS DE QUARTIERS.				RONDINAGE DE BRANCHES.				RONDINAGE DE BRINS.			
	6 mois.	1 an.	16 mois.	2 ans.	6 mois.	1 an.	18 mois.	2 ans.	6 mois.	1 an.	16 mois.	2 ans.
Hêtre.. .	23.34	19.34	17.40	17.74	33.48	24.00	10.80	20.32	30.44	23.46	18.60	19.95
Chêne. .	29.63	23.75	20.74	19.16	31.20	26.90	24.55	21.09	32.71	26.74	23.35	20.28
Charme .	24.68	20.18	18.77	17.94	31.38	25.89	22.33	19.30	27.19	23.08	20.60	18.59
Bouleau .	23.28	18.10	15.98	17.17	37.34	28.99	24.12	21.78	39.72	29.01	22.73	19.52
Tremble.	31.00	21.55	15.87	16.77	35.69	26.01	21.85	19.44	40.45	26.22	17.77	17.92
Aulne.. .	22.37	19.17	15.27	16.72	»	»	»	»	42.43	24.09	19.06	18 05
Saule.. .	»	»	»	»	»	»	»	»	36.44	23.13	17.12	17 58
Sapin.. .	28 56	16.65	14 78	17.22	28.29	17.14	15.09	18.66	33.78	16.87	15.21	18.09
Pin.. . .	29.31	28 54	15.81	17.96	35.30	17.59	15.72	17.39	41.49	18.07	15.63	17.42

Ce tableau fait voir qu'au bout d'un certain temps le bois reprend une portion de l'eau qu'il avait d'abord perdue.

278. *Charbon de bois.* Le charbon de bois donne moyennement 0,075 de cendres, et celui du commerce contient généralement de 10 à 12 pour 100 d'eau. M. Sauvage, ingénieur des mines, donne, pour la composition du charbon de bois fabriqué dans les forêts, 0,79 de carbone, 0,14 de matières volatiles et 0,07 de cendres.

D'après M. Despretz, la puissance calorifique du carbone pur est 7800; d'après les dernières expériences de Dulong, elle est 7170 (275); mais pour le charbon de bois fabriqué dans les forêts, on peut admettre, d'après M. Sauvage, que la puissance calorifique est les 0.85 environ de celle du carbone pur; elle serait donc $7170 \times 0.85 = 6095$; d'après M. Péclet, la puissance calorifique des charbons de bois varie de 6600 à 7000 unités (275).

Les valeurs relatives des divers charbons, sous le même volume, sont proportionnelles aux poids spécifiques de ces charbons, et sont, pour les charbons du commerce, 166 pour le charbon de noyer, 114 pour celui d'érable, 106 pour celui de chêne, et 75 pour celui de pin.

D'après M. Berthier, dans les départements du centre, le poids d'un mètre cube de charbon de chêne et de hêtre du commerce varie de 240 à 250^{k}; celui de bouleau, de 220 à 250^{k}, et celui de pin, de 200 à 210^{k}. Dans les Vosges, celui de chêne et de hêtre, rondinage, est de 228^{k}, et celui de sapin, 135^{k}. Dans les usines métallurgiques, dit M. d'Aubuisson, on admet généralement qu'un mètre cube de charbon en fragments de grosseur ordinaire pèse, pour le chêne et le hêtre, de 200 à 240^{k}; pour le pin et le mélèze, de 160 à 180^{k}, et pour le sapin et le châtaignier domestique, de 130 à 150^{k}.

D'après M. Péclet, le pouvoir rayonnant du charbon de bois est à peu près moitié de sa chaleur spécifique, c'est-à-dire que la quantité de chaleur qu'il rayonne est à peu près égale à la chaleur qu'entraîne la fumée, ou moitié de la chaleur totale développée (page 343).

D'après M. Berthier, tous les bois non résineux, carbonisés dans les mêmes circonstances, rendent, à poids égaux, la même quantité de charbon.

Par le mode de carbonisation en meules, employé dans les forêts, le bois ne donne que 17 à 18 pour cent de son poids en charbon; pour les grandes meules, cette proportion est un peu dépassée. En volume, les petites meules rendent de 26 à 30 pour cent, et les grandes, de 30 à 35. Le bois distillé en vase clos rend à peu près 28 pour cent de son poids en charbon.

Dans les départements des Ardennes et de la Meuse, les meules contiennent de 60 à 90 stères de bois (1/4 de hêtre et chêne, 1/4 de tremble et saule et 1/2 de charme) en bûchettes de $0^m,76$ à $0^m,81$ de longueur, et le rendement en poids est de 0,21 en moyenne. La carbonisation dure de 7 à 12 jours.

C'est vers l'âge de vingt ans qu'il convient d'aménager les bois destinés au charbonnage; on profite de la grande croissance du jeune âge, tout en obtenant le bois le plus convenable à la carbonisation (page 345).

Charbon roux. MM. Honzeau et Fauveau, en carbonisant incomplétement du bois au moyen des gaz d'un haut fourneau, obtiennent, pour une corde de bois pesant de 375 à 380 kilog., 220 kilog. d'un charbon brun foncé, produisant autant d'effet que $117^k,7$ de charbon ordinaire; le rendement apparent du bois est ainsi de 31 pour cent de son poids en charbon ordinaire.

Emploi de la vapeur surchauffée à la carbonisation et à la dessiccation des bois, ainsi qu'à la cuisson du pain, du biscuit et de la viande, par M. Violette, commissaire des poudres à la poudrière d'Esquerdes, près Saint-Omer.

Il s'agissait avant tout, pour M. Violette, de trouver les conditions thermométriques ou de température nécessaires et suffisantes à la transformation du bois en charbon doué de qualités déterminées et exigées dans diverses branches d'industrie. 100 parties de bois donnent, selon le mode de carbonisation, 40 parties ou 15 parties seulement de charbon, et il est évident que les deux charbons ainsi obtenus doivent différer dans leur composition chimique et leurs propriétés caractéristiques.

Le premier de ces charbons, d'une couleur rousse très-prononcée, contient deux fois plus de substances volatiles, et moitié moins de carbone pur que le second, qui est très-noir. Le premier est flexible, onctueux, moelleux au toucher; le second est roide, aigre, cassant. Le premier convient parfaitement, essentiellement à la fabrication

de la poudre de chasse superfine, et il importait d'arriver à le produire à coup sûr, sans mélange d'autres charbons. Telle est la première difficulté abordée et vaincue par M. Violette.

Il a constaté d'abord qu'à la température de 200° le bois ne se carbonise pas; qu'à 250° on n'obtient qu'un charbon non cuit, autrement dit des brûlots; qu'à 300° on forme le charbon *roux*, et qu'à 350° et au delà l'opération donne invariablement du charbon *noir*. Le temps nécessaire à la carbonisation varie d'ailleurs d'une demi-heure à trois heures; les produits passent progressivement et à volonté du charbon roux au charbon noir; le rendement enfin est d'autant moindre que la carbonisation est plus avancée.

On conçoit l'importance de ces premiers résultats, en se rappelant qu'on admettait que le bois ne se transformait en charbon qu'à la chaleur rouge, chaleur excessive si on la compare à la température de 250° ou 300°, démontrée suffisante par M. Violette.

C'est en faisant usage de la vapeur d'eau surchauffée qu'est produite la carbonisation. La vapeur est fournie par un générateur ordinaire; elle passe dans un serpentin contourné en hélice; elle en sort à une température déterminée, 300° par exemple, quand il s'agit de produire du charbon roux; elle enveloppe un cylindre horizontal qui renferme le bois; elle pénètre dans ce cylindre, échauffe le bois, opère sa carbonisation complète; elle sort enfin du cylindre chargée des produits de la distillation.

Par ce procédé nouveau, le rendement en charbon roux a été de 39 pour cent, c'est-à-dire que la proportion de charbon qu'il s'agissait de produire a été deux fois plus grande; il y a plus, la poudre fabriquée avec le nouveau charbon présente une supériorité réelle, et, ce qui est mieux encore, le prix de revient du charbon et de la poudre diminue dans une notable proportion.

M. Violette est arrivé aussi à la cuisson du pain et du biscuit de mer à l'aide d'un courant de vapeur d'eau chauffée à 200°.

La vapeur d'eau surchauffée dessèche aussi avec rapidité, et il paraît que pour les bois de toute essence ce mode de dessiccation augmente la résistance à la rupture dans une très-grande proportion, malgré la réduction notable de l'équarrissage.

Il y a une température à laquelle correspond le maximum d'augmentation de résistance. Cette température est comprise entre 150 et 175° pour le bois d'orme, et entre 125 et 150° pour les autres bois. L'accroissement de résistance est de 2/3 pour le frêne, de 5/9 pour le chêne, de près de 1/2 pour le noyer, de 2/5 pour le sapin, et de plus de 1/3 pour l'orme.

Charbon de Paris. M. Popelin-Ducarre a eu l'idée de faire un mélange de poussier de charbon de bois, de houille et de goudron, et de le mouler en petits cylindres ayant les dimensions du charbon de bois.

Ces cylindres, placés dans des vases clos que l'on chauffe à de hautes températures dans des fours continus, prennent une grande dureté et forment un charbon d'un excellent usage.

279. *Tannée.* M. Péclet rapporte que 1250 kilog. d'écorce de chêne donnent 1000 kilog. de tannée sèche, qui ont la même puissance calorifique que 800 kilog. de bois, ou que 270 à 300 kilog. de houille.

La puissance calorifique de la tannée parfaitement sèche est 3300, au lieu que celle de la tannée du commerce n'est que 2300.

Une machine de la force de 12 chevaux, construite dans un des faubourgs de Paris, consomme 12 kilog. de tannée par force de cheval et par heure.

A Paris, 1000 kilog. de tannée coûtent 10 fr.; l'équivalent de bois, 39 fr., et celui de houille, 15 fr.

280. *Tourbe.* La tourbe séchée à l'air libre, comme on le fait ordinairement, contient de 25 à 30 pour cent d'eau qu'on ne peut lui faire perdre qu'en l'exposant à un courant d'air à la température de 50 ou 60°.

***TABLEAU** des compositions de quelques tourbes, d'après M. Regnault, et de leurs puissances calorifiques, soit en prenant 23640 et 7800 pour les puissances calorifiques respectives de l'hydrogène en excès et du carbone; soit en prenant 34742 et 7170, comme les ont données les expériences de Dulong (275); soit encore en prenant les moyennes de ces valeurs.*

DÉSIGNATION des tourbes.	COMPOSITION.				HYDROGÈNE en excès.	PUISSANCE CALORIFIQ.		
	Carbone.	Hydrogène.	Oxigène.	Cendres		1re hypothèse	2e hypothèse	Moyen.
De Vulcaire, près Abbeville.	57.03	5.63	31.76	5.58	1.69	4848	4673	4761
De Long, près Abbeville.	58.09	5.93	31.37	4.61	2.04	5013	4873	4943
Du Champ-de-Feu, près Fromont. . .	57.79	6.11	30.07	5.33	2.30	5051	4943	4997

Les tourbes qui ont fourni les résultats de ce tableau étant parfaitement sèches, on doit considérer ces résultats comme supérieurs à ceux fournis par les tourbes employées en industrie, qui contiennent 25 pour cent d'eau. En tenant compte de cette eau, les tourbes du tableau donneraient 3600 pour puissance calorifique moyenne, c'est-à-dire à peu près celle du bois parfaitement sec ou moitié de celle de la houille moyenne (275); c'est ce que confirment les expériences en grand. On conçoit du reste qu'en raison de la composition si variable de la tourbe, il est impossible d'assigner une valeur générale à sa puissance calorifique; il y a des tourbes dont la puissance calorifique n'est que le 1/5 de celle de

la houille. Pour quelques machines à vapeur chauffées à la tourbe, on a brûlé 12 kilog. de tourbe par force de cheval et par heure.

D'après M. Péclet, la quantité de chaleur rayonnée par la tourbe est à celle totale développée par le combustible dans le rapport de 1 à 2,2 (page 343).

281. *Charbon de tourbe*. Le charbon de bonne tourbe contient de 14 à 18 pour cent de cendres.

On peut regarder la puissance calorifique du charbon de tonrbe comme étant égale à celle du charbon qu'il contient; elle est donc très-variable en raison de la quantité si diverse de cendres qui entre dans sa composition. Le charbon de tourbe d'Essone donnant 18,2 ponr cent de cendres, il en résulte que sa puissance calorifique est de $7170 \times 81,8 = 5865$ (275).

D'après M. Péclet, de même que pour la tourbe, la quantité de chaleur rayonnée par le charbon de tourbe est à la quantité totale de chaleur développée, dans le rapport de 1 à 2,2 (page 343).

La tourbe des Ardennes, carbonisée en grand dans des fours en maçonnerie, donne, d'après M. Sauvage, un produit de 44 pour cent, d'un charbon qui se compose de 0,43 de carbone, 0,32 de matières volatiles et combustibles et 0,25 de cendres. On peut considérer 0,40 à 0,45 comme le rendement des tourbes en charbon. En meules contenant ordinairement de 5,50 à 8,25 mètres cubes de tourbe, ce rendement en poids, rapporte M. Landrin, n'est que de 20 à 25 pour cent, et en volume, de 15 à 18.

282. *Lignite*, *houille* et *anthracite*.

En France, le bassin houiller le plus remarquable est celui da la Loire, qui se divise en deux parties distinctes, ayant pour centre, l'une Saint-Étienne, et l'autre Rive-de-Gier. Ce bassin fournit annuellement 15 millions de quintaux métriques, en deux variétés, dont l'une est de la houille grasse maréchale de première qualité, et dont l'autre, moins collante et plus solide, est très-recherchée comme charbon de grille. Dans les mines de la Loire, la proportion du menu dépasse souvent les 2/3 de la quantité de houille extraite; on en vend une partie en cet état, et le reste est transformé sur les lieux en coke.

Le bassin houiller de Valenciennes, qui est le prolongement du bassin belge de Mons, fournit 10 millions de quintaux par an. Les charbons d'Anzin sont gras, collants, en général peu sulfureux; ceux de Denain sont plus flambants, moins collants et meilleurs pour la grille. Les mines de Raismes fournissent un charbon de grille maigre; celles de Fresnes et du Vieux-Condé, un charbon sec anthraciteux. Le charbon d'Aniches est assez analogue à celui d'Anzin.

Alais, Decazeville, etc., produisent une grande quantité de houille consommée sur les lieux par les usines métallurgiques.

Le Creuzot donne une houille propre à la fabrication du coke. A Monceau, qui dépend de Blanzy, la houille est impropre à la fabrication du coke; elle n'est employée que comme charbon de grille. Lorsqu'on veut produire une forte chaleur, comme dans le puddlage de la fonte, il faut le mélanger avec des charbons gras comme ceux de la Loire.

Les mines de Decize, près de la Loire, fournissent un charbon flambant et sulfureux comme celui de Blanzy, mais plus collant et plus durable au feu.



Les mines de Fins, dans l'Allier, donnent du charbon de forge comparable à celui de Saint-Étienne ; celles de Commentry, dans le même département, en fournissent un qui est de très-bonne qualité et très-propre à la fabrication du coke.

Épinac (Saône-et-Loire) fournit des charbons de grille très-chauds, mais qui encrassent plus la grille que ceux de la Loire.

Les Alpes, le Maine et l'Anjou, produisent une grande quantité d'anthracite employé à la cuisson de la chaux et de la brique.

Le Midi renferme beaucoup de lignites.

Les 63 bassins houillers de la France produisent annuellement 44 millions de quintaux métriques; la consommation s'élevant à 66 millions de quintaux, l'importation est donc de 22 millions de quintaux, dans lesquels la Belgique figure pour 13 millions et demi et l'Angleterre pour 6 millions.

Le prix moyen de la houille, prise sur la mine, est 0f,90 les 100 kil. ou 0f,75 l'hectolitre. A Paris, le prix de l'hectolitre, en gros, est de 3 fr.

La houille, au moment de son extraction, ne contient que 0,02 d'eau; mais dans le commerce, comme on n'a pas soin de l'abriter, elle en renferme toujours une quantité considérable.

D'après l'examen du tableau page 354, on est conduit à admettre 7500 pour la puissance calorifique de la houille et de l'anthracite; c'est du reste la valeur que des expériences faites en grand semblent assigner à la puissance calorifique de ces combustibles (273).

Dans les foyers, la houille donne une quantité de cendres plus considérable qu'à l'analyse; cela est dû aux parcelles de coke qui tombent de la grille et qui échappent à la combustion. Voici les quantités de cendres recueillies dans le cendrier, à la manufacture des tabacs de Paris, en opérant sur plus de 600 kilog. de houille.

Houille dite ancien Anzin.	0.079
Id. de Newcastle (collante).	0.071
Id. de Denain (collante).	0 082
Id. dite nouvel Anzin (collante).	0.057
Id. de Decize (collante).	0.101
Id. des veines de Mathon et du Buisson (Belgique).	0.095
Id. dite Flenu, première qualité.	0.095

Dans les cas ordinaires de la pratique, les houilles donnent dans le cendrier un résidu variant de 10 à 20 pour cent, 15 à 16 en moyenne.

La houille se vend à la voie, qui équivaut à 15 hectolitres ras ou à 12 hectolitres combles; c'est l'hectolitre comble que l'on emploie généralement dans les mines.

TABLEAU des analyses de quelques combustibles, faites par M. Regnault. Les houilles de 1.36 à 1.60 pour 100. *La quantité d'azote étant toujours très-faible, on l'a confondue* contient ce *tableau, en admettant pour puissances calorifiques respectives de l'hydrogène* et 7170 (275); *les valeurs trouvées dans les deux hypothèses, et dont nous donnons*

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	LOCALITÉ.	DENSITÉ.
Combustibles de la formation carbonifère.		
Anthracite.	Pensylvanie.	1.462
Id.	Pays de Galles.	1.348
Id.	Mayenne.	1.367
Id.	Rolduc.	1.343
Houilles grasses et dures.	Alais (Rochebelle)	1.322
Id.	Rive-de-Gier (P. Henry)	1.315
Houilles grasses maréchales.	Rive-de-Gier, 1.	1.298
Id.	(Grand'Croix), 2.	1.302
Id.	Newcastle (Richardson).	1.280
Houilles grasses à longues flammes.	Flenu de Mons, 1.	1.276
Id.	*Id.* 2.	1.292
Id.	Rive-de-Gier (Cimetière), 1.	1.288
Id.	*Id.* *Id.* 2.	1.294
Id.	*Id.* (Couzon), 1.	1.298
Id.	*Id.* *Id.* 2.	1.311
Id.	Lavaysse.	1.284
Id.	Lancashyre (Canelcoal).	1.317
Id.	Épinac.	1.353
Id.	Commentry.	1.219
Houilles sèches à longues flammes.	Blanzy.	1.362
Combustibles des terrains secondaires.		
Anthracite.	Lamure.	1.362
Id.	Macot.	1.919
Houille	Obernkirchen.	1 279
Id.	Céral.	1.294
Id.	Noroy.	1.410
Jais.	Saint-Girons.	1.316
Id.	Bélertat.	1.305
Combustibles des terrains tertiaires.		
Lignite parfait.	Dax.	1.272
Id.	Bouches-du-Rhône.	1.254
Id.	Mont-Mésiner.	1.351
Id.	Basses-Alpes.	1.276
Lignite imparfait.	Grèce.	1.185
Id.	Cologne.	1.100
Id.	Usnach (bois fossile).	1.167
Lignite passant au bitume.	Ellebogen.	1.157
Id.	Cuba.	1.197
Asphalte.	»	1.063

ont été préalablement desséchées à 120°, ce qui leur a fait éprouver une perte qui a varié avec l'oxygène. M. Péclet a calculé les puissances calorifiques des combustibles que en excès et du carbone 23640 et 7800, et en adoptant les puissances de Dulong 34742 la moyenne dans la dernière colonne, ne diffèrent pas d'une manière très-sensible.

NATURE DU COKE.	POIDS du coke.	COMPOSITION.				HYDROGÈNE en excès.	PUISSANCE calorifique moyenne
		Carbone.	Hydrogène	Oxygène et azote.	Cendres.		
Pulvérulent. . .	84.83	90.45	2.43	2.45	4.67	2.09	7382
Id. . . .	89.72	92.56	3.33	2.53	1.58	2.98	7798
Id. . . .	89.96	91.98	3.92	3.16	0.94	3.48	7807
Id. . . .	86.96	91.45	4.18	3.12	2.25	3.95	7998
Boursouflé. . . .	76.29	89.27	4.85	4.47	1.41	4.23	7881
Id. . . .	73.34	87.85	4.90	4.29	2.90	4.30	7831
Très-boursouflé.	66.72	87.45	5.14	5.63	1.78	4.36	7644
Id. . . .	68.36	87.79	4.86	5.91	1.44	4.04	7678
Id. . . .	»	87.95	5.24	5.41	1.40	4.49	7894
Boursouflé. . . .	»	84.67	5.29	7.94	2.10	4.18	7558
Id. . . .	»	83.87	5.42	7.03	3.68	4.44	7573
Id. . . .	67.33	82.04	5.27	9.12	3.57	4.00	7307
Id. . . .	66.11	84.83	5.01	6.57	2.99	4.69	7789
Id. . . .	61.88	82.58	5.59	9.11	2.72	4.32	7441
Id. . . .	60.28	81.71	4.99	7.98	5.32	3.88	7248
Id. . . .	52.77	82.12	5.27	7.48	5.13	4.23	7381
Id. . . .	55.35	83.75	5.66	8.04	2.55	4.54	7594
Id. . . .	59.97	81.12	5.10	11.25	2.53	3.53	7098
Id. . . .	63.16	82.72	5.29	11.75	0.24	3.65	7236
Fritté.	54.72	76.48	5.23	16.01	2.28	3.09	6626
Pulvérulent. . .	89.5	89.77	1.67	3.99	4.57	1.49	7201
Id. . . .	88.9	71.49	0.92	1.12	20.47	0.79	5581
Très-boursouflé.	77.8	89.50	4.83	4.67	1.00	4.27	7945
Fritté.	53.3	75.38	4.74	9.02	1.86	3.66	6716
Pulvérulent. . .	51.2	63.28	4.35	13.17	19.20	2.77	5443
Fritté.	42.5	72.94	5.45	17.53	4.08	3.35	6438
Id. . . .	42.0	75.41	5.79	17.91	0.89	3.64	6603
Pulvérulent. . .	49.1	70.49	5.59	18.93	4.99	3.32	6225
Id . . .	41.1	63.88	4.58	18.11	13.43	2.41	5495
Id. . . .	48.5	71.71	4.85	21.67	1.77	2.25	6024
Id. . . .	49.5	70.02	5.20	21.77	3.01	2.59	5997
Analogue au char-	38.9	61.20	5.00	24.78	9.02	2.03	5173
bon de bois.	30.1	63.29	4.98	26.24	5.49	1.83	5271
	»	56.04	5.70	36.07	2.19	1.38	4597
Boursouflé. . . .	27.4	73.79	7.46	13.79	4.96	5.81	7218
Id. . . .	39.0	75.85	7.25	12.96	3.04	5.70	7341
Id. . . .	9.0	79.18	9.30	8.72	2.80	8.26	8339

POIDS moyen de l'hectolitre ras de houilles de différentes localités.

Houille de la mine de Labarthe	88 kilog.
Id. d'Auvergne et de Blanzy	87
Id. de la mine de Combelle	86
Id. de la mine de Lataupe	85
Id. de la mine de Saint-Étienne	84
Id. de Decize	83
Id. du Creuzot	79
Id. de Mons	80

M. Péclet, sans avoir fait d'expériences directes pour déterminer la quantité de chaleur rayonnée dans la combustion de la houille, pense qu'elle est plus considérable que pour le charbon de bois (275).

Depuis quelques années, dans un grand nombre de bassins houillers, par un lavage, on est parvenu à priver la houille de la majeure partie des schistes, pyrites et matières terreuses qui s'y trouvent mélangés lors de l'extraction, et à obtenir ainsi une houille plus convenable pour la métallurgie et surtout pour le chauffage des locomotives.

Les lavoirs usités consistent, avec plus ou moins de modifications, en une pompe qui foule l'eau près du fond d'une caisse sur le double fond percé de trous de laquelle est placée la houille à laver. Par le soulèvement que produit le mouvement continu ou alternatif de l'eau, les matières se disposent par ordre de densité, et on peut séparer la houille des schistes qui se sont stratifiés sur le double fond de la caisse.

Depuis bien des années, M. Marsais, ingénieur, directeur des mines de Saint-Étienne, moule la houille menue, et aujourd'hui on le fait avec avantage en France et en Angleterre.

A Blanzy, on commence par laver la houille menue dans la caisse à double fond dont nous venons de parler; on retire la houille lavée pour la mettre en tas et la laisser égoutter; alors on la concasse en grains plus petits et à peu près uniformes, en la faisant passer entre deux cylindres cannelés. La houille étant ainsi préparée, on la dessèche à 200° dans des fours, et on l'imprègne à chaud de 7 à 8 pour 100 de brai (goudron de houille concentré), que l'on rend liquide en l'échauffant et que l'on fait arriver dans le four. Le mélange étant opéré dans le four, on retire la matière, que l'on place dans des moules en fonte à angles arrondis de 0m,32 de longueur, 0m,16 de largeur et 0m,16 de profondeur, où on la comprime sous une pression de 20000 kilog. Les péras prennent ainsi une grande dureté, qui s'accroît encore par le refroidissement, au point de devenir plus grande que pour les péras naturels.

Ces péras artificiels conviennent surtout pour les bateaux, où ils font gagner 0,2 d'espace dans les soutes; de plus ils se transportent aisément

sans déchet sensible, et ils se conservent plusieurs années sans altération. Au moment de les utiliser, on les brise, et leurs fragments anguleux fournissent un combustible qui brûle dans de bonnes conditions, et en donnant au moins autant de chaleur que la houille.

La houille menue, outre la fabrication du coke, est encore employée pour faire des briquettes, pains de pâte de houille et de 1/15 d'argile; en France on la brûle encore sur les grilles. La proportion de houille menue est environ moitié de la quantité totale exploitée, et elle n'a presque pas de valeur; ainsi, à Saint-Étienne, le gros charbon se vend 2 fr. les 100 kil., la gaillette 1f,25, et le menu seulement 0f,25 à 0f,50.

283. *Coke*. La perte de chaleur due à la carbonisation de la houille est près de la moitié de la chaleur produite par la combustion complète de la houille.

La quantité de noir de fumée qu'on peut recueillir d'un four à coke est à peu près la 30e partie de la houille, et le poids du coke est environ moitié de celui de la houille qui l'a produit.

La puissance calorifique du coke est moyennement de 6000 unités (275).

Un mètre cube de coke, tel qu'on l'emploie dans les hauts fourneaux, pèse ordinairement 400 kilog. A Paris, le coke des usines à gaz pèse de 30 à 35 kilog. l'hectolitre comble.

On carbonise la houille, soit en meules, comme on le fait pour le bois, soit en vases clos, comme dans la fabrication du gaz de l'éclairage.

Les meules ont 5 à 6 mètres de diamètre sur 1 mètre de hauteur, et l'opération dure de 40 à 48 heures. Au lieu de faire les tas circulaires, on leur donne de préférence la forme d'un demi-cylindre qui a de 10 à 20 mètres de longueur sur 2 à 3 mètres de largeur et 0m,60 de hauteur.

En France, on carbonise la houille dans des fours circulaires, ou elliptiques, ou encore cylindriques, construits en briques. Les charges varient de 20 à 25 hectolitres de houille, et l'opération dure ordinairement 24 heures.

Dans les fours, le produit en poids est plus grand que dans les meules, et en volume il est plus petit. Dans les grands appareils, le volume du coke est ordinairement égal à celui de la houille; cependant, pour la houille grasse, le volume du coke surpasse quelquefois celui de la houille de 30 pour cent et souvent il l'excède de 5 à 15 pour cent; mais pour la houille maigre, il est ordinairement plus petit.

Le coke fabriqué en vase clos, comme dans la préparation du gaz de l'éclairage, ne peut être employé à la métallurgie du fer.

***PERTE** en poids due à la distillation de quelques houilles, d'après des expériences faites à la manufacture des tabacs par* **MM. Clément, Guenlveau et Lefroy.**

Houille de Blanzy (Saône-et-Loire)	0.44
Newcastle	0.395
Flenu, première variété (Mons)	0.39
Houille de Decize (Nièvre)	0.365
Id. des veines du Mathon et du Buisson (Belgique)	0.36
Flenu, deuxième variété	0.355
Houille dite nouvel Anzin	0.345
Id. de Denain	0.325
Id. dite ancien Anzin	0.255

M. Péclet pense que la chaleur rayonnée dans la combustion du coke est plus considérable que pour le charbon de bois (275).

AIR NÉCESSAIRE A LA COMBUSTION.

284. *Quantité d'air nécessaire à la combustion.* L'acide carbonique étant composé de 27,36 de carbone et de 72,64 d'oxygène, 1 kilogramme de carbone exige, pour passer à l'état d'acide carbonique, $\frac{72.64 \times 1}{27.36} = 2^{k},65$ d'oxygène, c'est-à-dire, $\frac{2.65}{1.43} = 1^{m.\,cu.},85$ d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$ (un mètre cube d'air pesant $1^{k},30$, et la densité de l'oxygène étant 1.1026), ou bien $\frac{1.85 \times 100}{21} = 8^{m.\,cu.},81$ d'air atmosphérique à la même température et à la même pression (l'air étant composé de 21 d'oxygène pour 79 d'azote).

L'eau étant composée de 11,1 d'hydrogène et de 88,9 d'oxygène, il s'ensuit que 1 kilog. d'hydrogène exige pour sa combustion 8 kilog. ou $5^{m.\,cu.},6$ d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$; ce qui équivaut à $26^{m.\,cu.},66$ d'air à la même température et sous la même pression.

Connaissant alors la quantité de carbone et celle d'hydrogène en excès que contient un combustible, il sera facile de déterminer la quantité d'air théoriquement nécessaire à sa combustion.

Comme, en pratique, une quantité considérable de l'air qui passe dans le foyer échappe à la combustion, il s'ensuit que pour brûler un kilogramme de combustible, il faut une quantité d'air bien plus grande que celle théoriquement nécessaire. On estime que pour le bois 1/3 de l'air qui passe dans le foyer échappe à la combustion, et que pour les autres combustibles il y en a moitié.

C'est d'après ces suppositions que M. Péclet a obtenu les résultats du tableau suivant, qui donne les quantités d'air théoriques et pratiques nécessaires à la combustion d'un kilogram. de quelques combustibles.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	COMPOSITION.		VOLUME D'AIR.	
	Carbone.	Hydrogène en excès.	Théorique.	Pratique.
			m. c.	m. c.
Bois parfaitement desséché.	0.51	0	4 50	6.75
Bois ordinaire à 0.20 d'eau.	0.416	0	3.60	5.40
Charbon de bois.	0.93	0	8.20	16.40
Tannée..	»	»	3.50	7.00
Tourbe parfaitement sèche.	0.58	0.02	5.64	11.28
Tourbe à 0.20 d'eau.	0.464	0.016	4.51	9.02
Charbon de tourbe (0.25 de cend.).	0.75	0.0	6.60	13 20
Houille moyenne..	0.88	0.05	9.05	18.10
Coke à 0.15 de cendres.	0.85	0.0	7.50	15.00

285. *Volume de gaz qui passe par la cheminée d'un foyer.* Le volume de l'acide carbonique étant, à la même température et à la même pression, égal à celui de l'air qui l'a formé, si le combustible ne contenait que du carbone, le volume de gaz qui passerait par la cheminée serait égal au volume d'air qui arrive sur le foyer, ramené à la température de la cheminée; mais il passe aussi de la vapeur d'eau qui provient :

1° De l'eau contenue dans le combustible, et qui donne, par kilog., un volume de $1^{mc},696$ de vapeur à 100° (266), lequel, ramené fictivement à 0°, devient $\frac{1,696}{1+0,367}=1^{mc},24$; (256)

2° De l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions convenables pour faire de l'eau; ainsi un kilog. de bois contenant ces deux gaz dans la proportion de 48 pour cent d'eau donnera un volume de vapeur, ramenée fictivement à 0°, égal à $1,24\times0,48=0^{m},60$; si le bois était à 20 pour cent d'eau, ce volume de vapeur à 0° serait $1,24\ (0,20+0,48\times0,80)=0^{mc},72$; la tannée donne à peu près le même résultat ;

3° De l'hydrogène en excès. 1 kilog. d'hydrogène exigeant 8 kilog. d'oxygène pour se brûler, c'est-à-dire pour se convertir en eau (284), il en résulte que chaque kilog. d'oxygène brûlé donnera $1_k,125$ de vapeur d'eau, ou $1,24\times1,125=1^{mc},4$ environ de vapeur ramenée fictivement à 0°. Comme 1 kilog. d'oxygène à 0° et sous la pression $0^m,76$ occupe un volume de $0^{mc},70$ (44), il en résulte que chaque kilog. d'oxygène converti en vapeur donnera une augmentation de volume à 0° de $1,4-0,7=0^{mc},7$; ce qui fait voir que l'augmentation de volume est égale au volume de l'oxygène brûlé, ou encore que le volume de vapeur produit est double de celui de l'oxygène. La tourbe complétement desséchée contenant encore 0,30 de son poids d'eau et 0,02 d'hydrogène en excès, l'augmentation de volume due à la vapeur d'eau,

ramenée fictivement à 0°, sera, par kilog. de tourbe, $0{,}30 \times 1{,}24 + 0{,}02 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc},48$. En suivant une marche analogue, on déterminerait cette augmentation pour 1 kilogramme d'un combustible quelconque dont on connaît la composition; c'est ainsi qu'a été formé le tableau suivant.

TABLEAU donnant, pour un kilogramme de quelques combustibles : 1° le volume d'air à 0°, qui passe par le foyer pour opérer la combustion d'un kilogramme de ces combustibles; 2° le volume de vapeur provenant des causes qui viennent d'être citées, ramené fictivement à 0°; 3° le volume total de gaz qui passe par la cheminée; 4° le volume total de gaz qui passe par la cheminée, en faisant le coefficient de dilatation des gaz égal à 0.00367 (256), *et la température* t = 300° (*température ordinaire des gaz dans la cheminée*), *ce qui donne* $1 + at = 2{,}1$.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	AIR froid.	VAPEUR à 0°.	VOLUME DE GAZ dans la cheminée, la température de la cheminée étant	
			t = valeur quelconque.	$t = 300°$.
	m. c.	m. c.	m. c.	m. c.
Bois parfaitement desséché. . . .	6.75	0.60	7.35 $(1+at)$	15.43
Bois ordinaire à 0.20 d'eau. . . .	5.40	0.72	6.12 $(1+at)$	12.85
Charbon de bois.	16.40	0.0	16.40 $(1+at)$	34.44
Tourbe desséchée.	11.25	0.48	11.73 $(1+at)$	24.63
Tourbe ordinaire.	9.02	0.63	9.65 $(1+at)$	20.26
Charbon de tourbe.	13.20	0.0	13 20 $(1+at)$	27.72
Houille moyenne.	18.10	0.34	18.44 $(1+at)$	38.72
Coke à 0.15 de cendres.	15.00	0.0	15.00 $(1+at)$	31.50

Les nombres de ce tableau supposent que tout le combustible est brûlé; mais comme en pratique une partie du combustible tombe de la grille et échappe à la combustion, ainsi pour les houilles on obtient de 10 à 20 pour cent de résidu, on doit considérer ces nombres comme étant des maximums qui donneront toujours des résultats suffisants dans le calcul des dimensions de la cheminée. Des expériences faites à Wesserling, sur une même chaudière à vapeur, ont donné un volume de gaz sortant par la cheminée égal à $6\,(1+at)$ pour le bois, et à $16\,(1+at)$ pour la houille à 0,16 de résidu.

CHEMINÉES.

286. *Mouvement de l'air chaud dans un tuyau vertical.* Négligeant les frottements de l'air contre les parois du tuyau, si on considère la couche d'air chaud qui sort du tuyau, elle est pressée de haut en bas par la pression atmosphérique comptée à partir du haut du tuyau, et de bas en haut par la pression atmosphérique comptée à partir du bas du

tuyau, diminuée du poids de la colonne verticale d'air chaud contenue dans le tuyau ; elle est donc en définitive sollicitée de bas en haut par la différence de poids de deux colonnes égales à la hauteur verticale H du tuyau, l'une d'air froid et l'autre d'air chaud; or cette différence est évidemment égale au poids d'une colonne d'air chaud égale à la dilatation de H, c'est-à-dire d'une colonne égale à

$$\frac{Ha(t'-t)}{1+at} \text{ ou à peu près } Ha(t'-t); \qquad (256)$$

on a donc

$$v=\sqrt{2g\,Ha(t'-t)}. \qquad (207)$$

H hauteur verticale du tuyau dans lequel circule l'air chaud;
$a=0.00367$ coefficient de dilatation de l'air (255);
t' température moyenne de l'air dans le tuyau, et que nous supposerons constante sur toute la longueur du tuyau ;
t température de l'air extérieur;
v vitesse avec laquelle l'air chaud s'écoule par l'orifice supérieur du tuyau.

100 parties d'air contenant 79 d'azote et 21 d'oxygène, comme le volume d'acide carbonique est égal au volume de l'oxygène qui l'a formé, et que les densités de l'azote et de l'acide carbonique sont respectivement 0,972 et 1,524, la densité de l'air entièrement brûlé est donc $\frac{0,972\times 79+1,524\times 21}{100}=1,088$. Supposant que dans nos foyers la moitié de l'air échappe à la combustion, il en résulte que la densité des gaz qui s'échappent dans la cheminée est $\frac{1+1,088}{2}=1,044$, densité qui diffère trop peu de celle de l'air, qui est 1, pour qu'on ne puisse les supposer égales, et prendre pour vitesse ascensionnelle de la fumée dans les cheminées, celle fournie par la formule précédente.

Le frottement contre les parois du tuyau ou de la cheminée est considérable, et en admettant que les gaz chauds se comportent comme les gaz froids (208), on peut poser, pour un tuyau vertical,

$$P-p=n'\frac{Hv^2}{D}. \qquad (a)$$

$P=Ha(t'-t)$ pression qui produit l'écoulement du gaz au bas du tuyau, estimée par une colonne d'air chaud; c'est la pression nécessaire pour vaincre les frottements du gaz dans le tuyau et produire l'écoulement de ce gaz (P est représenté par H au n° 208).

$p=\frac{v^2}{2g}$ pression qui produit la vitesse effective v, avec laquelle le gaz sort du tuyau; p est aussi estimé en air chaud (p est représenté par h au n° 208);

$P-p$ perte de pression ascensionnelle due au frottement;

D diamètre du tuyau, ou côté du canal si la section est carrée; cela est indifférent, vu que le rapport de la section au périmètre est le même pour le

cercle que pour le carré circonscrit, et que le frottement est proportionnel au contour de la section et en raison inverse de cette section;

n' coefficient constant pour une même nature de cheminée, et qui est égal, d'après M. Péclet.

à 0.0127 pour les cheminées en poterie;
à 0.005 pour les cheminées en tôle;
à 0.0025 pour les cheminées en fonte;
et à 0.0025 pour toutes les cheminées tapissées de suie.

Dans cette formule v est la vitesse à l'extrémité de la conduite, au lieu d'être la vitesse moyenne (208); du reste, dans le cas des cheminées, ces deux vitesses peuvent être considérées comme étant égales quand leur différence dépend seulement de la variation de pression, mais non d'un échauffement direct des gaz.

Si le canal était incliné ou faisait des circuits, on aurait, en négligeant l'influence des coudes, ce que l'on peut généralement faire dans ce cas (n° 208, page 257),

$$P - p = n' \frac{Lv^2}{D}. \qquad (b)$$

$P = Ha\ (t' - t)$, H étant la hauteur verticale du canal;
L développement total du canal.

Si l'air circulait froid dans une portion de la conduite et chaud dans l'autre, la perte de force ascensionnelle se composerait de la perte dans chaque portion de la conduite, et on aurait

$$P - p = n' \frac{L'v^2}{D\delta} + n' \frac{L''v^2}{D}.$$

$P = Ha\ (t' - t)$, H étant la hauteur verticale de la partie L'' de la conduite;
L' développement du circuit d'air froid;
L'' développement du circuit d'air chaud;
$v'^2 = \frac{v^2}{\delta^2}$ vitesse de l'air froid dans la partie L' de la conduite; δ est le rapport de la densité de l'air froid à celle de l'air chaud; comme la partie de $P - p$ correspondant à L' serait exprimée en air froid, on la convertit en air chaud en multipliant par δ; c'est pourquoi on a simplement remplacé v'^2 par $\frac{v^2}{\delta}$ dans le premier terme du second membre de l'équation précédente. Si le diamètre de la conduite d'air froid, au lieu d'être D, était d, on aurait $v'^2 = \frac{v^2}{\delta^2} \times \frac{D^4}{d^4}$.

Supposant le diamètre de la conduite constant sur toute sa longueur, la formule précédente devient

$$P - p = n' \frac{v^2}{D}\left(\frac{L'}{\delta} + L''\right). \qquad (c)$$

Remplaçant, dans les formules précédentes (*a*), (*b*) et (*c*), *p* par sa valeur $\frac{v^2}{2g}$, elles donnent respectivement :

$$v = \sqrt{\frac{2gPD}{D + 2gn'H}}, \quad (a') \qquad v = \sqrt{\frac{2gPD}{D + 2gn'L}}, \quad (b')$$

$$v = \sqrt{\frac{2gPD}{D + 2gn'\left(\frac{L'}{\delta} + L''\right)}}. \quad (c')$$

M. Péclet a reconnu par expérience que la formule (*b'*) se vérifiait d'une manière satisfaisante.

Pour une cheminée verticale rétrécie à sa partie supérieure, la formule (*a*) devient, en remarquant que la résistance due au frottement est proportionnelle au carré de la vitesse, et par conséquent en raison inverse du carré de la section,

$$P - p = n' \frac{Hv^2}{D} \times \frac{s^2k^2}{S^2};$$

d'où on tire, en faisant $p = \frac{v^2}{2g}$,

$$v = \sqrt{\frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gn'Hs^2k^2}}. \quad (a'')$$

S section de la cheminée ;
s section de l'orifice d'écoulement ;
k coefficient de la dépense (207).

Si on suppose $\frac{S}{s}$ très-grand, on pourra négliger $2gn'Hs^2k^2$ près de DS^2, et la formule précédente donnera

$$v = \sqrt{2gP};$$

c'est-à-dire que le frottement sera nul, et la vitesse de sortie par l'orifice sera égale à la vitesse théorique. On obtient à peu près la vitesse maxima, quand le diamètre de la cheminée est égal à 2 ou 3 fois celui de l'orifice ; au-dessus de cette limite, la vitesse n'augmente plus que d'une manière presque insensible.

Pour une cheminée rétrécie à la partie supérieure et sinueuse, la formule (*b'*) devient, d'après les considérations qui ont servi à établir la formule (*a''*),

$$v = \sqrt{\frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gn'Ls^2k^2}}, \quad (b'')$$

et la formule (*c'*),

$$v = \sqrt{\frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gn's^2k^2\left(\frac{L'}{\delta} + L''\right)}}. \qquad (c'')$$

Cheminée rétrécie à la partie inférieure. D'après les expériences de M. Péclet, une cheminée circulaire en fonte de 17 mètres de hauteur, et de 0^m,0314 de section ou de 0^m,20 de diamètre, ayant fonctionné d'abord tout ouverte, et ensuite fermée successivement à la partie inférieure par des plaques portant des orifices circulaires de 0^m,11, 0^m,055 et 0^m,0275 de diamètre, les vitesses v observées ont été respectivement 4^m,73, 2^m,84, 1^m,70 et 0^m,81.

Dans ces expériences la vitesse théorique $v = \sqrt{2gHa(t'-t)}$, due à la colonne d'air chaud, était 10^m,74, et la résistance $P - p$, due au frottement, 0,21 v^2.

De ces mêmes expériences, il résulte que, pour une même cheminée, la vitesse dans le rétrécissement inférieur est d'autant plus grande que le diamètre de ce rétrécissement est plus petit. Dans la dernière des expériences qui viennent d'être citées, la section de la cheminée était 0^{mc},0314, et celle de l'orifice circulaire d'entrée, 0^{mc},0006, d'où il résulte que la vitesse de la fumée dans la cheminée ayant été 0^m,81, dans l'orifice inférieur elle était $\frac{0,81 \times 0,0314}{0,0006} = 42^m,39$, c'est-à-dire à peu près égale à 4 fois celle 10^m,74, due à la colonne d'air chaud contenue dans la cheminée.

La vitesse dans l'étranglement augmente encore quand on raccorde l'orifice avec la cheminée par une partie évasée.

On n'a pas encore donné d'expression analytique de la résistance qui résulte d'un étranglement brusque; seulement, M. Péclet a conclu de ses expériences :

1° Que dans une conduite d'air, la perte de hauteur motrice produite par un étranglement est beaucoup plus petite que la hauteur qui correspond à la différence des vitesses dans et après l'étranglement;

2° Que la perte réelle est un peu plus grande que la différence des hauteurs correspondant aux vitesses, multipliée par le rapport de la surface de l'orifice à celle du canal qui suit l'étranglement;

3° Que le rélargissement brusque d'un canal, du moins dans une certaine étendue et dans une certaine limite, a peu d'influence.

287. *Maximum de tirage des cheminées.* La vitesse effective de l'air dans une cheminée peut être mise sous la forme

$$v = \sqrt{\frac{2g}{m} Ha(t'-t)},$$

ou plus simplement

$$v = \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}}.$$

v, H, a, t' et t ont les mêmes significations qu'au n° 286;
m et M sont des nombres constants pour une même cheminée, mais qui varient suivant la nature, la forme et les dimensions des cheminées.

Désignant par V le volume d'air écoulé en une seconde par une cheminée carrée dont le côté est D, on a, en conservant les mêmes annotations qu'au n° 286,

$$V = D^2 v = D^2 \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}};$$

et si on désigne par Q_1 le poids de ce volume d'air, on aura

$$Q_1 = D^2 \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}} \times \frac{1^k,3}{1+at'} = 1^k,3D^2 \sqrt{\frac{Ha}{M} \times \frac{t'-t}{(1+at')^2}}.$$

$1^k.3$ poids d'un mètre cube d'air à 0° et sous la pression $0^m.76$ (43);
$\frac{1^k.3}{1+at'}$ poids d'un mètre cube d'air à la température de la cheminée (256).

La dernière expression de la valeur de Q_1 fait voir que, pour une valeur déterminée de H, cette dépense est maximum quand $\frac{t'-t}{(1+at')^2}$ est maximum; ce qui a lieu, d'après les règles du calcul différentiel, quand on a $t' = \frac{1}{a} + 2t = 273 + 2t$: ainsi en supposant $t = 0°$, le maximum de tirage correspond à $t' = 273°$; si $t = 12°$, ce qui a lieu moyennement, le maximum de tirage correspond à $t' = 297°$, soit, pour la pratique, $t' = 300°$.

M. Péclet, en supposant $t = 0°$, a dressé un tableau des valeurs de $\sqrt{\frac{t'}{(1+at')^2}}$ correspondant aux différentes valeurs de t'.

De ce tableau, il résulte que quand $t = 0°$, le tirage d'une cheminée reste à peu près constant pour des valeurs de t' comprises entre 250° et 300°, et qu'il varie très-peu pour des valeurs de t' comprises entre 210° et 350°.

Supposant $t' = 297°$ et $t = 12°$, on a $\sqrt{\frac{t'-t}{(1+at')^2}} = 8,1$, et l'effet maximum produit par le tirage de la cheminée peut être mis sous la forme

$$1,3 \times D^2 \times 8,1 \sqrt{\frac{Ha}{M}} = 0,63D^2 \sqrt{\frac{H}{M}}.$$

288. *Dimensions des cheminées*. En appelant L' le développement du canal de fumée depuis le foyer jusqu'au pied de la cheminée, D le diamètre de ce canal, que l'on suppose être aussi celui de la cheminée, on a, d'après la formule (b'), n° 286, en conservant les mêmes annotations que dans ce numéro et en remplaçant P par $Ha(t'-t)$,

Formule pratique Section … [illegible]

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t'-t)D}{D+2gn'(L'+H)}}.$$

Cette formule fait voir que la vitesse ascensionnelle de la fumée est d'autant plus grande que H est plus grand ; rarement, pour les cheminées d'usines, H a moins de 12 mètres et plus de 30 mètres.

Pour une cheminée ordinaire de chaudière à vapeur, la perte de pression due aux différentes causes qui diminuent le tirage peut être exprimée, d'après la formule (*b*), n° 286, par

$$P-p=P-\frac{v^2}{2g}=n'\frac{Lv^2}{D}+Rv^2;$$

d'où on tire

$$v=\sqrt{\frac{2gPD}{D+2gn'L+2gRD}} \text{ (formule } (b') \text{ n° 286).}$$

L longueur du canal de diamètre D qui produirait la même résistance que la totalité du circuit de la fumée depuis le foyer jusqu'en haut de la cheminée ; pour les chaudières à vapeur, la section des carneaux étant égale à celle de la cheminée, il en résulte que L est égale à la totalité de ce circuit.

$n'\frac{Lv^2}{D}$ perte de pression due au frottement de la fumée contre les parois des carneaux de la cheminée ;

Rv^2 somme des résistances dues au passage de l'air dans le foyer. D'après M. Péclet, les foyers étant bien construits et ayant un décimètre carré de surface de grille pour 1^k ou $1^k.2$ de houille à brûler par heure, on a, en tenant une épaisseur de 6 à 8 centimètres de houille sur la grille, $R=0.61$, et par suite $2gR=12$.

Comme on a $n'=0,0025$ pour une cheminée quelconque tapissée de suie (286), on a donc

$$v=\sqrt{\frac{2gPD}{13D+0,05L}}. \qquad (a)$$

Soit maintenant V le volume d'air chaud qui doit s'écouler par la cheminée en une seconde, on a

$$V=\frac{QV_1(1+0,00367t')}{3600}. \qquad (b)$$

Q poids du combustible à brûler par heure ;
V_1 volume d'air froid nécessaire à la combustion d'un kilogramme de combustible (284).

On a aussi, en supposant la cheminée carrée,

$$V=vD^2;$$

où, en remplaçant v par sa valeur (a),

$$V=\sqrt{\frac{2gPD^5}{13D+0,05L}};$$

d'où on tire

$$D^5=\frac{V^2(13D+0,05L)}{2gP}. \qquad (c)$$

Dans cette équation tout est connu à l'exception de D, dont on pourra alors tirer la valeur. Pour y arriver, on néglige le terme 0,05L dans l'équation précédente, ce qui donne

$$D^4=\frac{13V^2}{2gP}. \qquad (d)$$

De cette nouvelle équation on tire une première valeur de D; on la substitue dans le second membre de l'équation (c), de laquelle on tire une deuxième valeur de D plus exacte que la première, et qu'on peut adopter en pratique; cependant, si on voulait plus d'exactitude encore, on placerait cette deuxième valeur de D dans le second membre de l'équation (c), qui fournirait une troisième valeur de D plus exacte encore que la deuxième, sans cependant en différer d'une manière sensible. En continuant ainsi de suite, les valeurs de D se rapprocheraient de plus en plus de la valeur satisfaisant à l'équation (c).

Application. Soit à déterminer le côté D de la section d'une cheminée carrée de 15 mètres de hauteur, le circuit total de la fumée ayant 50 mètres de développement et une section constante, et la quantité de houille brûlée par heure étant de 80 kilog.

Supposant $t'=297°$ et $t=12°$, on a

$$P=15\times 0,00367\,(297-12)=15^m,62, \qquad (286)$$

et la vitesse théorique $\sqrt{2gP}=17^m,50$.

On a $V_1=18^{mc},44$, et la formule (b) donne

$$V=\frac{80\times 18,44\,(1+0,00367\times 297)}{3600}=0^{mc},854.$$

La formule (d) donne alors

$$D=\sqrt[4]{\frac{13\times 0,854\times 0,854}{2\times 9,8088\times 15,62}}=0^m,42. \qquad (1^{re})$$

Substituant cette première valeur de D dans l'équation (c), on a

$$D=\sqrt[5]{\frac{0,854\times 0,854\,(13\times 0,42+0,05\times 50)}{2\times 9,8088\times 15,62}}=0^m,453 \quad (2^e).$$

Remplaçant $0^m,42$ par $0^m,453$ dans cette équation, on en tirerait $D = 0^m,458$, troisième valeur sensiblement égale à la deuxième.

Supposant toujours $t' = 297°$, $t = 12°$ et le poids de houille à brûler par heure égal à 80 kilog., on trouve, en supposant constant et égal à 35 mètres l'espace que parcourt la fumée avant d'entrer dans la cheminée, mais en faisant varier la hauteur de la cheminée, les résultats du tableau suivant.

DÉSIGNATION DES RÉSULTATS.	HAUTEUR DE LA CHEMINÉE.				
	10m.	15m.	20m.	25m.	30m.
Circuits entiers de la fumée.	45^m	50^m	55^m	60^m	65^m
Valeurs de $P = Ha(t' - t)$.	10.41	15.62	20.82	20.03	31.23
Vitesses théoriques $\sqrt{2gP}$.	14.29	17.50	20.21	22.60	24.75
Vitesses pratiques $\frac{V}{D^2} = \frac{0^m.854}{D^2}$.	3.49	4.16	4.71	5.16	5.55
Rapport de ces vitesses.	4.10	4.20	4.29	4.35	4.46
Deuxièmes valeurs de D.	0.495	0.453	0.426	0.407	0.392
Sections D^2 en décimètres carrés.	24.50	20.52	18.15	16.57	15.37
Poids de houille brûlés par heure et par décimèt. carré de section des cheminées.	$3^k.27$	$3^k.90$	$4^k.41$	$4^k.83$	$5^k.20$

La formule (c) donne des résultats qui s'accordent bien avec les dimensions des cheminées des chaudières à vapeur qui donnent le plus d'effet utile. Il vaut mieux augmenter un peu les résultats donnés par cette formule que les diminuer, on obtient un excès de tirage qu'on modère avec le registre ; mais, comme généralement la cheminée va en se rétrécissant de bas en haut, il suffit de prendre pour sa section en haut les résultats que donne la formule.

Il sera facile de modifier les résultats du tableau précédent pour la généralité des cas qui pourront se présenter dans la pratique, et éviter de faire les calculs qu'exigent les formules (d) et (c).

Pour une cheminée ordinaire d'appartement, l'expérience prouve qu'une section de 3 à 4 décimètres carrés est presque toujours suffisante (323).

289. ***Cheminées communes à plusieurs foyers.*** Lorsqu'une cheminée sert pour plusieurs foyers, on fait sa section égale à la somme des sections des cheminées de tous les foyers en particulier ; la section ainsi obtenue est un peu grande, mais l'excès de tirage qui en résulte est très-avantageux.

290. ***Température de l'air sortant du foyer, et perte de chaleur due à la température de l'air dans la cheminée.***

La température de l'air sortant du foyer est donnée par la formule

$$T = \frac{E \times 4}{V \times 1,3}.$$

T température des gaz sortant du foyer;
E puissance calorifique du combustible (275);
4 rapport approché de la capacité calorifique de l'eau à celle de l'air (261);
V volume de fumée ramené à 0° produit par un kilogramme de combustible (285); la formule suppose la capacité calorique de la fumée égale à celle de l'air;
1k.3 poids d'un mètre cube d'air ou de fumée à 0° (43).

La perte de chaleur due à la température que conserve l'air en arrivant à la cheminée est, pour un kilogramme de combustible,

$$P = E \frac{t'}{T}.$$

P perte de chaleur en unités (259);
t' température de l'air dans la cheminée;

Des deux formules précédentes on conclut les résultats du tableau suivant. Ces résultats supposent la température de l'air extérieur égale à 0°, et la température de la fumée dans la cheminée égale à 300°.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	PUISSANCE calorifique.	VOLUME de gaz et de vapeur produit.	TEMPÉRATURE de la fumée sortant du foyer.	PERTE de chaleur P par la cheminée.
	unités.	m c.		unités.
Bois parfaitement sec.	3600	7.35	1507°	717
Bois ordinaire à 0.20 d'eau.	2800	6.12	1408	597
Houille moyenne.	7500	18.44	1251	1798
Coke à 0.15 de cendres.	6000	15.00	1231	1462
Tourbe complétement desséchée.	4800	11.73	1259	1144
Tourbe ordinaire à 0.20 d'eau.	3600	9.65	1148	941
Charbon de bois.	7000	16.40	1313	1599

Ce tableau fait voir que la chaleur que la fumée emporte dans la cheminée est le 1/4 environ de la chaleur totale développée par le combustible.

291. *Construction des cheminées.* Quand les cheminées en briques sont basses, on peut les faire prismatiques à l'intérieur, en ne donnant un fruit qu'à leurs parements extérieurs; quand elles sont très-élevées, on leur donne une forme pyramidale à l'intérieur et à l'extérieur.

L'épaisseur des grandes cheminées d'usines est ordinairement de 0m,11, la largeur d'une brique, à la partie supérieure; la pente intérieure est de 0m,015 à 0m,018 par mètre, et la pente extérieure de 0m,024 à 0m,030. Comme l'épaisseur de la maçonnerie va en diminuant à mesure qu'on s'élève, afin de ne pas tailler les briques, on construit la cheminée pyramidale à l'extérieur, et on rachète le fruit intérieur par des ressauts brusques de 0m,11.

Lorsque la température de la fumée ne dépasse pas 300°, on peut

faire les cheminées en briques ordinaires reliées par un mortier de chaux et de sable fin; le plâtre ne doit être employé que pour des températures inférieures à 100°. Si la température de la fumée atteint 300°, le parement intérieur de la cheminée doit être en briques réfractaires, surtout à la partie inférieure.

Actuellement on construit les cheminées sans échafaudages extérieurs, qui étaient coûteux ; à mesure qu'on s'élève, on encastre dans la maçonnerie, à l'intérieur, des barres de fer espacées de 0m,60, formant une échelle qui sert à la construction et aux réparations. Un bon ouvrier, servi par un manœuvre qui lui passe les briques et le mortier, élève une cheminée ordinaire en quelques semaines.

292. *Tirage produit par un ventilateur.* Aux bains Vigier, la fumée, après avoir circulé autour de la chaudière, passe simultanément dans douze petits tubes de 20 mètres de longueur plongés dans l'eau froide qui doit servir à alimenter la chaudière. La fumée, en sortant de ces tubes, dans lesquels elle se refroidit complétement, est foulée dans la cheminée par un ventilateur qui a 0m,80 de diamètre et 0m,40 de largeur; le tuyau d'écoulement a 0m,20 de diamètre. Ce ventilateur, mû par un seul homme, fait 40 tours par minute, et suffit à l'appel de la fumée provenant de 0,44 stère de bois pelard, pesant 171 kilogrammes, brûlés en deux heures; ce qui fait par heure 85 kilog. qui équivalent à peu près à 42 kilog. de houille. Supposant que le tirage à l'air chaud absorbe le 1/4 de la chaleur totale développée par le combustible, un homme, dans les circonstances défavorables que nous venons de citer, a donc produit l'effet de $\frac{42}{4} = 10^{k},5$ de houille, qui correspondent à la force de 2,5 chevaux-vapeur ou de 17 hommes.

Dans une brasserie de Louvain, un ventilateur absorbant l'effet de 6 chevaux suffit en une heure à la combustion de 1000 kilog. de houille, dont le 1/4, c'est-à-dire 250 kilog., serait absorbé par le tirage à l'air chaud; dans ce cas, 6 chevaux en remplacent donc de 50 à 60.

Pour un cheval-vapeur, on brûle en 10 heures à peu près 40 kil. de houille, qui coûtent 2 fr. à Paris; un *homme-vapeur* pendant 10 heures coûte donc $\frac{2}{7} = 0^{f},30$; comme il faut 2 hommes vivants pour un travail journalier de 10 heures, ce travail coûterait donc 4 fr. environ à Paris, c'est-à-dire autant que celui de 2 chevaux-vapeur, ou que 14 fois celui d'un *homme-vapeur*. Cela suppose toutefois qu'on néglige l'entretien de la machine, l'intérêt des frais d'établissement et l'amortissement de ces frais; du reste, ces causes de dépense sont peu de chose quand la force est prise sur une machine qui commande déjà d'autres appareils.

293. *Tirage produit par un jet de vapeur.* On n'a pas encore fait d'expériences pour déterminer le rapport entre le travail développé par

un jet de vapeur qui se dégage suivant l'axe d'un tuyau ouvert par les deux bouts, et celui absorbé par le poids d'air qu'il met en mouvement ; mais il est probable que tout le travail dépensé par la vapeur est utilisé pour imprimer le mouvement à l'air et vaincre le frottement contre les parois du tuyau. v étant la vitesse de la vapeur à l'origine du tuyau et v' sa vitesse à la sortie, le travail dépensé par un poids P de vapeur est

$$\frac{P(v^2 - v'^2)}{2g}. \qquad (31)$$

Ce mode de tirage est employé dans les machines locomotives. La fumée en sortant du foyer traverse simultanément, pour se rendre à la cheminée, de 80 à 170 tubes de $0^m,04$ à $0^m,054$ de diamètre intérieur et de $2^m,10$ à $2^m,75$ de longueur. Le diamètre de la cheminée varie de $0^m,32$ à $0^m,35$, d'où il résulte que le volume d'air qui passe en une seconde par la cheminée variant de 3,72 à 8 mètres cubes, la vitesse d'écoulement varie de 45 à 83 mètres par seconde, au lieu de 2 à 3 mètres qu'elle pourrait être par le simple tirage de la cheminée (288).

D'après MM. Flachat et Petiet, en négligeant les frottements de l'air dans la cheminée, le travail produit par le jet de vapeur n'est que de la 1/2 au 1/6 du travail total qu'il pourrait produire.

FOYERS.

294. *Dimensions des différentes parties d'un foyer* (*fig.* 53 et 54, n° 296). L'ouverture du cendrier doit être assez grande pour laisser passer l'air froid nécessaire à la combustion ; elle doit être au moins égale à la section des carneaux, et il convient, pour ne pas brûler de combustible inutilement, de la garnir d'une porte que l'on ferme pendant les heures de repos.

Les barreaux des grilles ont ordinairement de $0^m,03$ à $0^m,024$ de largeur, et ils sont espacés entre eux de $0^m,01$ à $0^m,008$; quelquefois cette épaisseur est réduite à $0^m,015$, avec toujours 1/4 environ d'espace libre. Les combustibles qui se divisent sur la grille exigent des intervalles très-faibles entre les barreaux.

Les barreaux en fer sont rectangulaires, et souvent carrés ; ceux en fonte sont plus larges en haut qu'en bas, afin que, malgré leur plus grande hauteur, qui atteint de $0^m,08$ à $0^m,10$ au milieu pour des barreaux de 1 mètre de longueur, la grille ne s'encrasse pas. Les barreaux en fonte ont un peu la forme d'un solide d'égale résistance (227); ainsi des barreaux ayant de $0^m,08$ à $0^m,10$ de hauteur au milieu n'auraient que de $0^m,05$ à $0^m,06$ aux extrémités, mais avec une épaisseur supérieure uniforme. Des petites saillies latérales venues aux extrémités des barreaux, ainsi qu'au milieu quand ils sont longs, en maintiennent l'écartement.

La surface des grilles est de 1 décimètre carré pour 1 kilog. ou 1,2 kilog. de houille à brûler par heure; cependant on va à 1 ,5 et même à 2 kilog. sans que l'effet en soit sensiblement diminué. Pour quelques grilles, cette consommation a été réduite jusqu'à 0^k,3; mais alors il faut que le tirage à travers la grille soit faible, comme, par exemple, sous les chaudières en plomb. D'après quelques résultats obtenus, on peut admettre que les grandes grilles sont favorables à l'effet produit par le combustible, mais il est plus difficile d'en obtenir un feu d'une intensité uniforme (299).

L'épaisseur de houille sur la grille varie de 0^m,05 à 0^m,08, suivant qu'elle est plus ou moins menue. Pour les combustibles qui ne donnent pas de flamme, comme le coke et les houilles sèches, dont la consommation par heure varie de 0^k,6 à 0^k,75 par décimètre carré de surface de grille, l'épaisseur de la couche de combustible sur la grille varie de 0^m,20 à 0^m,30. Dans les locomotives, où le tirage est très-grand, chaque décimètre carré de surface de grille brûle environ 4^k,30 de coke par heure. Pour le bois, la surface de la grille est de 3 décimètres carrés par 10 kilog. de bois à brûler par heure.

Pour la houille, la distance entre la grille et la chaudière varie de 0^m,30 à 0^m,35, et elle atteint 0^m,40 et même 0^m,45 pour les grands foyers; pour la tourbe, cette distance est de 0^m,50; pour le coke, elle est de 0^m,60, et pour le bois, de 0^m,60 à 0^m,75.

Les portes de foyer ont de 0^m,25 à 0^m,30 de hauteur, avec une largeur seulement suffisante pour pouvoir facilement charger et tisonner la grille. La distance de la porte au devant de la grille varie de 0^m,30 à 0^m,45, suivant les dimensions du foyer.

295. *Combustion des gaz sortant d'un haut-fourneau.* La quantité d'air nécessaire à la combustion des gaz qui sortent d'un haut-fourneau est à peu près les 4/5 de la quantité introduite dans le haut-fourneau, et la pression avec laquelle il convient de l'injecter dans les gaz est de 0^m,15 à 0^m,16 d'eau. MM. Thomas et Laurens ont utilisé les gaz des hauts-fourneaux pour le chauffage des fours à puddler. La grille se compose d'une cinquantaine de petites buses concentriques à de plus grandes; par les premières arrive l'air amené préalablement à la température de 400° à 500°, et à la pression de 0^m,15 à 0^m,20 d'eau, et par les secondes arrivent les gaz amenés à la température de 200° à 300° et à la pression de 0^m,05 à 0^m,06 d'eau. Les buses à air n'arrivent pas jusqu'aux extrémités des buses à gaz.

CHAUDIÈRES A VAPEUR.

296. La figure 53 représente, à l'échelle de 1/30, la *coupe par l'axe d'un fourneau et d'une chaudière à vapeur munie de tous les accessoires dont elle peut être garnie.*

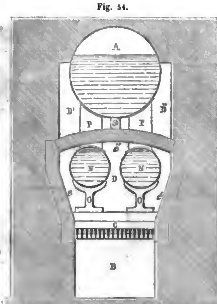


Fig. 53.

A Chaudière.
B cendrier.
C grille.
D, D', D'' carneaux. La fumée, en quittant la grille, suit le fond de la chaudière dans D; elle s'élève en D', revient sur le devant du fourneau par un côté de la chaudière; puis elle tourne en D'' pour regagner le derrière du fourneau en suivant l'autre côté de la chaudière; enfin un canal la conduit à la cheminée;
E tuyau de prise de vapeur;
F tuyau d'alimentation de la chaudière;
G robinet de vidange de la chaudière;
H *trou d'homme*, à fermeture autoclave formée par une plaque de fonte; il permet d'entrer dans la chaudière pour la nettoyer;
I sifflet d'alarme;
i flotteur du sifflet d'alarme;
i' contre-poids de ce flotteur;
K soupape de sûreté chargée par l'intermédiaire d'un levier;
L indicateur à flotteur *l*, et à contre-poids *l'*, du niveau de l'eau dans la chaudière;
M tube en verre placé au devant du fourneau, et indiquant le niveau de l'eau dans la chaudière;
N, N' robinets indicateurs du niveau; l'un doit toujours donner de l'eau, et l'autre de la vapeur;
O embrasure en fonte formant l'ouverture du foyer, et sur laquelle se fixe et s'applique la porte;
Q tige servant à manœuvrer le registre qui règle le tirage, en permettant de fermer plus ou moins le canal qui conduit la fumée à la cheminée;
e, e' parties en briques réfractaires.

La figure 54 est, à l'échelle de 1/20, *la coupe perpendiculaire à l'axe d'un fourneau et d'une chaudière à bouilleurs.*

Fig. 54.



A chaudière;
B cendrier;
C grille;
D, D', D'' carneaux. La fumée va du foyer à l'autre extrémité de la chaudière par D; elle revient au devant de la chaudière par D', et elle s'en retourne derrière par D'', pour de là aller à la cheminée;
N, N bouilleurs;
P, P cuissards; ils établissent la communication entre la chaudière et les bouilleurs;
e, e', e'' parties en briques réfractaires.

297. *Transmission de la chaleur à travers des plaques métalliques.* On admet en physique que la quantité de chaleur qui passe à travers une plaque homogène à faces parallèles, est proportionnelle à la différence des températures des deux faces de la plaque, et en raison inverse de son épaisseur. M. Péclet a cherché à vérifier cette loi par expérience; et il a reconnu que pour des plaques métalliques, chauffées d'un côté par l'eau ou par la vapeur et refroidies de l'autre par l'eau, l'influence de l'épaisseur des plaques disparaissait quand on ne renouvelait pas convenablement l'eau en contact avec leurs faces; mais que la loi relative à l'épaisseur se vérifiait quand l'eau était vivement agitée. M. Péclet a aussi reconnu que la quantité de chaleur qui passerait en une seconde à travers une plaque de plomb de 1 mètre carré de surface et de 0m,001 d'épaisseur, pour une différence de température de 1° entre les deux faces, serait de 3,84 unités. Alors, en admettant les coefficients de conductibilité des métaux du n° 245, la quantité de chaleur qui passerait à travers une même plaque placée dans les mêmes circonstances serait pour :

L'or.	21.30	La fonte.	12.28	Le plomb.	3.84
Le platine.	20.90	Le fer.	8.01	Le marbre.	0.50
L'argent.	20.81	Le zinc.	7.77	La porcelaine. . . .	0.26
Le cuivre.	19.16	L'étain.	6.50	La terre cuite. . . .	0.24

D'après Clément, une plaque de cuivre de 1 mètre carré de surface et de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, dont une face est chauffée par de la vapeur à 100°, et dont l'autre est refroidie par de l'eau à 28°, condense par heure 100 kilog. de vapeur; ce qui fait seulement 0,21 d'unité de chaleur qui passent à travers la plaque, par seconde et pour une différence de température de 1°. D'après MM. Thomas et Laurens, au moyen d'un tuyau en cuivre d'un petit diamètre, on aurait condensé 400 kilog. de vapeur par mètre carré de surface de tuyau, par heure et pour une différence de température de 43°; ce qui ferait 1,36 unités de chaleur qui passeraient à travers 1 mètre carré de surface de tuyau, par seconde, pour une différence de température de 1°. On doit sans doute attribuer l'excès de ce résultat sur celui de Clément, à ce que l'air étant chassé dans le tuyau, il n'empêchait pas le contact de la vapeur avec les parois refroidissantes. D'après ces résultats et celui du tableau précédent, on voit la différence énorme de chaleur qui passe à travers une plaque de cuivre, suivant qu'on agite ou non le liquide en contact (consulter l'article *Chauffage*).

Lorsqu'on échauffe un liquide par un gaz, comme dans les chaudières à vapeur, ou un gaz par un autre, comme dans les calorifères, on peut, en pratique, négliger l'influence de l'épaisseur du métal.

298. *Métaux employés à la fabrication des chaudières à vapeur. Prix.* Ces métaux sont la fonte, la tôle et le cuivre rouge (240); mais on emploie généralement la tôle, à cause de sa grande ténacité et de son prix modéré; cependant, pour les petits appareils, il convient d'employer le cuivre, qui se courbe facilement sur un très-petit rayon.

D'après les expériences de Tredgold et celles de Clément Desormes; la fonte, la tôle rouillée et le cuivre noirci laissent passer à peu près la même quantité de chaleur dans le même temps, la fonte étant au premier rang et le cuivre au dernier; dans les chaudières à vapeur, la couche de suie tend encore à rendre égaux les effets de ces métaux.

Le prix de vente des chaudières ordinaires est, pour 100 kilog., 90 fr. pour celles en tôle; 450 fr. pour celles en cuivre et 45 fr. pour celles en fonte.

Les vieilles chaudières se revendent, pour 100 kilog., 15 à 20 fr., suivant leur état, si elles sont en tôle; 250 fr. si elles sont en cuivre, et 12 fr. si elles sont en fonte.

La durée relative de ces diverses chaudières est une considération très-importante qui doit guider dans leur choix; mais cette durée, qui dépend des qualités de la matière dont la chaudière est fabriquée, de l'usage de la chaudière et de la manière dont le feu est conduit, est tout à fait indéterminée; tout ce que l'on peut dire, c'est que, toutes choses égales d'ailleurs, les chaudières en cuivre ont une plus grande durée que les autres. Ce sont surtout le capital premier et son intérêt qui donnent l'avantage aux chaudières en tôle et en fonte sur celles

en cuivre; on rejette les chaudières en fonte à cause de leur éclat facile par un changement brusque de température.

M. Bardies aîné, associé de la maison de chaudronnerie de Mme Decoudun, nous communique la note suivante :

« Le prix des chaudières à vapeur varie suivant leur forme, leur timbre, qui détermine l'épaisseur, et leur force en chevaux.

» Prenant pour point de départ la forme ordinaire à deux bouilleurs, et le timbre 5, on peut compter en moyenne, pour les chaudières en tôle, 225 kilog. par force de cheval, au prix de 100 fr. les 100 kilog., et pour celles en cuivre, 250 kilog. par cheval, au prix de 460 fr. les 100 kilog.

» Les progrès de la chaudronnerie ne permettent pas d'être exclusif quant à ces données; il faut tenir compte des formes nouvelles qui viennent chaque jour apporter des économies comme poids, comme volume, comme vaporisation. Des chaudières sont tubulaires, horizontales ou verticales; d'autres sont tubulaires et à foyer intérieur, forme locomotive et locomobile. On ne peut rien préciser quant au prix de ces chaudières, d'une construction assez difficile; cependant on peut compter en moyenne sur 150 fr. les 100 kilog. pour le fer, et sur 480 fr. les 100 kilog. pour les tubes.

» Le prix de revente des vieilles chaudières est de 15 fr. les 100 kilog., vu qu'il faut tenir compte de leur démolition, les maîtres de forges n'achetant que de menues ferrailles. »

299. *Surface de chauffe des chaudières à vapeur.* D'après M. Christian, un mètre carré de surface de chaudière en fonte, entièrement plongé dans la flamme d'un feu violent, produit 100 kilog. de vapeur à l'heure. Clément a obtenu les mêmes résultats pour une chaudière en cuivre de 3 millimètres d'épaisseur placée dans les mêmes circonstances.

On n'a pas d'expériences bien concluantes sur la puissance de vaporisation de la surface en contact avec les carneaux. Les chaudières ordinaires les mieux établies, c'est-à-dire celles qui produisent de 6 à 6,50 kilog. de vapeur par kilogramme de houille, avec dégagement de fumée à 300°, ne produisent en une heure que de 15 à 20 kilog. de vapeur par mètre carré de surface de chauffe totale. Des constructeurs comptent quelquefois sur 25 kilog.; mais il vaut mieux déterminer la surface de chauffe en ne comptant que sur une production de 20 kil. au maximum. Les chaudières d'établissements de bains ne produisent que 12 kil. environ de vapeur, ou mieux ne laissent passer que la quantité de chaleur équivalente à cette production, par mètre carré de surface de chauffe et par heure. Les chaudières de bateaux en produisent de 30 à 35 kilog., mais elles consomment beaucoup de combustible.

La surface de chauffe se compose de la surface totale des bouilleurs et de la partie de la surface de la chaudière comprise au-dessous du niveau supérieur des carneaux, niveau qui se trouve à 0m,10 ou 0m,12 au-dessus de l'axe de la chaudière; les parties des bouilleurs et de la chaudière en contact avec les murettes qui divisent les carneaux sont regardées comme surface de chauffe.

Dans les locomotives, on admet que chaque mètre carré de la surface de chauffe qui voit le foyer produit trois fois plus de vapeur qu'un mètre carré de surface de tuyau, et que, en considérant comme surface de chauffe (*dite surface de chauffe réduite*), la surface qui voit le foyer, augmentée du 1/3 de la surface des tubes, chaque mètre carré produit de 120 à 160 kilog. de vapeur à l'heure (Voir la 4e partie).

Connaissant la quantité de vapeur à produire, on détermine facilement, d'après ce qui précède, la surface de chauffe nécessaire, et par suite les dimensions de la chaudière.

Lorsque l'effet à produire exige deux chaudières, il convient d'en établir trois, afin que toujours une d'elles soit en réparation pendant que les deux autres fonctionnent; par là, on évite les interruptions de travail.

TABLEAU des expériences de M. Cavé sur les chaudières avec ou sans bouilleurs.

SURFACE de grille en décimèt. carrés.	SURFACE de chauffe en mètres carrés.	RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille.	MODE d'alimentation.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par décim. carré de surf. de grille.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par mètre carré de surf. de chauffe.	VAPEUR produite, en kilogrammes, par heure et par m. c. de surf. de chauffe.	VAPEUR produite, en kilogrammes, par kil. de houille.	NATURE DU COMBUSTIBLE.
1° Chaudière de 1 mètre de diamètre et 8 mètres de longueur, sans bouilleurs. La flamme va au fond, en contact avec la moitié du fond et de la partie latérale de la chaudière, et revient au devant en contact avec l'autre moitié, pour s'en retourner à la cheminée par un conduit isolé, au milieu duquel est le tube réchauffeur, de 0m.30 de diamètre et de 6m.25 de longueur chauffée.								
165	12.50	7,6	eau froide.	0.24	3.16	24.60	7.79	Gaillette de Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.24	*Id.*	27.65	8.72	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.24	*Id.*	24.50	7.75	
82	*Id.*	15 2	*Id.*	0.48	*Id.*	24.50	7.75	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.48	*Id.*	23.80	7.55	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.48	*Id.*	24.40	7.71	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.39	2.55	16.40	6.45	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.70	4.60	28.80	6.30	
Id.	*Id.*	*Id.*	tube réch.	0.48	3.16	24.70	7.80	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.39	2.55	18.90	7.42	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.48	3.16	24.00	7.60	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.48	3.15	21.90	6.90	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.53	3.56	23.30	6.55	

SURFACE de grille en décimèt. carrés.	SURFACE de chauffe en mètres carrés.	RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille.	MODE d'alimentation.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par décim. carré de surf. de grille.	par mètre carré de surf. de chauffe.	VAPEUR produite, en kilogrammes, par heure et par m. c. de surf. de chauffe.	par kil. de houille.	NATURE DU COMBUSTIBLE.
82	12.50	15.2	tube réch.	0.47	3.10	21.30	6.90	Gailliette de Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.46	3.06	21.30	6.90	*Id.*
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.46	3.06	20.30	6.62	Toutvenaot.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.46	3.02	20.70	6.85	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.54	3.56	21.10	5.92	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.54	3.56	21.00	5.90	
66	*Id.*	19.0	*Id.*	0.60	3.16	22.80	7.20	Grosse gaill. de Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.56	2.96	24.75	8.35	Gaill. de Denaio.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.60	3.16	21.10	6.62	Fin Denain, passé à la claie.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.60	3.16	24.36	7.70	Gaill. impure.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.60	3.16	20.00	6.32	Gaill. passée à la claie.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.57	2.98	25.00	8.32	Gaill. de Denain.

2° Même chaudière saos bouilleurs ni retour de fumée. La flamme va directement à la cheminée en léchant toute la surface de chauffe.

82	12.50	15.2	eau froide.	0.73	4.80	27.20	5.68	Presque pur Saint-Étienne.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.73	4.80	27.00	5.60	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.81	5.30	27.50	5.20	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.81	5.30	30.00	5.70	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.81	5.30	31.00	5.86	
165	*Id.*	7.6	*Id.*	0.44	5.80	34.80	6.00	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	5.80	35.60	6.17	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	5.80	37.00	6.41	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	5.80	37.00	6.41	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	5.80	36.90	6.40	

3° Chaudière de 1m.06 de diamètre et de 8m.30 de longueur, à bouilleurs de 0m.40 de diamètre. La flamme va au food, eo contact avec le food de la chaudière et les 2/3 du contour des bouilleurs, revient au devant en contact à la fois avec le reste de la surface de chauffe, et s'en retourne par le canal du tube réchauffeur.

165	32.18	19.5	eau froide.	0.24	1.20	8.60	7.12	Gaill. de Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.24	1.20	9.10	7.59	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.24	1.20	9.12	7.60	
Id.	*Id.*	*Id.*	tube réch.	0.24	1.20	8.30	6.90	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.35	1.75	11.95	6.82	

4° Chaudière de 0m.80 de diamètre et de 5m.88 de longucur, à deux bouilleurs de 0m.40 de diamètre, sans retour de fumée. La flamme va directement à la chemluée en léchaot à la fois tout le contour des bouilleurs et la moitié de celui de la chaudière.

165	21.36	13.0	eau froide.	0.39	3.60	21.07	6.90	Mélange de Toutvenant, Saint-Étienoe et Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.39	3.00	21.07	6.90	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.35	2.74	19.90	7.30	
82	*Id.*	26.0	*Id.*	0.78	3.00	17.50	5.82	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.75	2.90	17.50	6.02	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.57	2.18	13.85	6.35	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.57	2.18	13.40	6.18	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.52	2.01	11.42	5.70	
165	*Id.*	13.0	*Id.*	0.44	3.40	20.50	6.02	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	3.40	20.40	6.00	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	3.40	22.40	6.50	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	0.44	3.40	21.80	6.46	

SURFACE de grille en décimèt. carrés.	SURFACE de chauffe en mètres carrés.	RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille.	MODE d'alimentation.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes,		VAPEUR produite, en kilogrammes,		NATURE DU COMBUSTIBLE.
				par décim. carré de surf. de grille.	par mètre carré de surf. de chauffe.	par heure et par m. c. de surf. de chauffe.	par kil. de houille.	
5° Même chaudière à deux bouilleurs, avec retour simultané de flamme de chaque côté, et fuite à la cheminée par le canal du tube réchauffeur.								
165	21.36	13.0	tube réch.	0.44	3.40	20.90	6.15	Toutvenant et Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	21.40	6.30	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	22.80	6.72	Gaill. de Denain.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	23.00	6.78	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	20.50	6.02	Gaill. de Commentry.
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	20.70	6.10	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	21.25	6.27	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	21.40	6.30	
Id.	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*	22.30	6.59	

D'après ce tableau, la quantité moyenne de vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe totale et par heure est de 22k,25.

Ce tableau fait voir aussi que les chaudières à bouilleurs ne sont pas aussi avantageuses qu'on pouvait le supposer: c'est ce qui fait que depuis quelque temps des constructeurs suppriment les bouilleurs, et se contentent de mettre latéralement et parallèlement à la chaudière des tubes chauffés par la fumée, et dans lesquels l'eau circule avant de pénétrer dans la chaudière.

Le faible rendement des chaudières à bouilleurs est dû à ce que la vapeur qui se forme dans les bouilleurs ne trouvant pas un écoulement assez facile par les cuissards, qui sont trop petits et en nombre insuffisant, les bouilleurs, qui devraient former la partie la plus active de la surface de chauffe, ne produisent que l'effet de tubes réchauffeurs.

Enfin, de l'examen de ce même tableau, il résulte que la quantité moyenne d'eau vaporisée par kilogramme de houille a dépassé 8 kilog. dans les deux circonstances suivantes :

1° Chaudière cylindrique sans bouilleur, à circulation dans deux galeries et un conduit allant à la cheminée (21m de circulation totale et 2 coudes), le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 7,6, la surface de chauffe 12m,5, et la quantité totale de houille brûlée, 39k,5, c'est-à-dire 0k,24 par décimètre carré de surface de grille.

2° La chaudière précédente avec tube réchauffeur, dans les mêmes circonstances de circulation, le rapport de la surface de chauffe à celle

de la grille étant 19, et la quantité totale de houille brûlée étant $37^{k},15$ en moyenne.

Des expériences de M. Cavé, il paraît résulter que le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 17, et la surface de la grille un décimètre carré par $0^{k},40$ de houille à brûler, on se trouve dans les conditions les plus favorables pour obtenir 8 kil. de vapeur par kil. de charbon ; mais il convient de considérer $0^{k},40$ comme étant une limite inférieure.

Dans les chaudières de M. Farcot, les bouilleurs sont remplacés par 4 tubes placés parallèlement à la chaudière et à côté de celle-ci. L'eau s'échauffe en circulant successivement dans les tubes, en sens contraire de la fumée, avant de se rendre dans la chaudière, sur laquelle se trouve l'unique prise de vapeur. Une chaudière de ce système, qui a valu à son auteur la moitié du prix de 10,000 francs proposé par la Société d'Encouragement, a produit les résultats suivants :

Durée de l'expérience.	$9^{h}55^{m}$
Puissance au frein.	$30^{ch},75$
Diamètre du corps de la chaudière.	$1^{m},00$
Id. de chacun des 4 bouilleurs.	$0^{m},40$
Longueur de la chaudière et des bouilleurs.	$6^{m},00$
Surface de chauffe totale.	$39^{m},00$
Id. de grille.	$0^{m},84$
Houille anglaise de roche brûlée, par force de cheval et par heure.	$1^{k},32$
Eau totale dépensée par kilogramme de houille. . . .	$7^{k},425$
Id. par cheval et par heure.	$9^{k},803$

300. *Vapeur produite par 1 kilog. de combustible.* La puissance calorifique de la houille étant 7500, et la vaporisation de 1 kil. d'eau à 0° absorbant 650 unités de chaleur (263), 1 kil. de houille devrait produire 11,54 kil. de vapeur ; mais, en pratique, le charbon qui échappe à la combustion en tombant de la grille, le rayonnement perdu du foyer, le refroidissement des différentes parties du fourneau, et la chaleur que la fumée emporte dans la cheminée font qu'on est loin d'atteindre cette limite. Pour les chaudières ordinaires les mieux établies, 1 kil. de houille ne produit que de 6 à 6 50 kil. de vapeur; pour le plus grand nombre, il n'en produit que 5 kil., et pour les chaudières de bateaux, dont la surface de chauffe est petite (299), il n'en produit que de 3 à 4 kil. MM. Grouvelle et Jaunez, dans leur *Guide du chauffeur*, donnent les résultats du tableau suivant :

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	VAPEUR produite par 1 kil. de combustible.	PUISSANCES calorifiques relatives.	PRESSION DE LA VAPEUR.
	k.		
Houille grasse de Mons.	5.00	0.86	4 à 5 atmosphères.
Id.	6.25	1.00	1 atmosphère.
Id.	7.00	1.12	Évaporat. à basse tempér.
Houille très-cassante, en petits morceaux.	4.50	0.72	Haute pression.
Id.	5.00	0.80	Basse pression.
Coke fabriqué au four (1re qualité).	4.65	0.74	Haute press.(chaud.ord.)
Id.	5.80	0.92	Locomotives.
Bois de sapin et hêtre, de 13 mois.	2.70	0.43	Basse pression.
Bois de chêne.	2.50	0 40	*Id*
Charbon de bois.	6.00	0.96	*Id.*
Lignite.	3.50	0.56	*Id.*
Tourbe (1re qualité).	2.70	0.43	*Id.*
Id. compacte comprimée. . .	4.00	0.64	*Id.*
Tannée séchée.	2.00	0.32	*Id.*

301. *Chaudières à vapeur placées sur des fours à puddler, à réchauffer et à affiner*. Un four à puddler consomme moyennement 85 kil. de houille à l'heure, et un four à réchauffer de 100 à 110 kilog. La section de la cheminée de ces fours est ordinairement d'un décimètre carré pour une consommation de 4^k à $4^k,5$ de houille à l'heure (288), et la section de la grille, de 4 décimètres carrés pour la même consommation (294).

Quand un four à puddler ou à réchauffer est muni d'une chaudière à vapeur, il faut, d'après M. Grouvelle, que la section de la cheminée et des carneaux soit d'un décimètre carré pour une consommation de 3 kil. à $3^k,50$ de houille à l'heure. Des expériences faites par M. Lucas Championnière tendent à prouver qu'il y aurait utilité à augmenter un peu cette section : ainsi elles ont fait voir qu'au-dessus de 3 kil. par décimètre carré, le tirage et le travail souffraient toujours; aussi a-t-on porté la section à un décimètre carré pour $2^k.7$ de houille.

La hauteur de la cheminée varie de 12 à 13 mètres.

Pour les fours à réchauffer, il convient également d'adopter les proportions précédentes, en ayant égard à la plus grande consommation de charbon.

La surface de chauffe peut être la même que si le charbon était brûlé directement sous la chaudière. Il résulte aussi, d'après M. Grouvelle, que la production des chaudières placées à la suite des fours à réchauffer est de 4 à 5 kilog. de vapeur à 5 atmosphères, par kilog. de houille brûlée, et que celle des chaudières placées à la suite des fours à puddler est de 3^k à $3^k,5$ seulement; mais, d'après d'autres renseigne-

ments, dit M. Péclet, il paraîtrait que ces dernières produisent de 4 à 5 kilog. de vapeur par kilogramme de houille, et que chaque mètre carré de surface de chauffe fournit de 16 à 18 kilog. de vapeur à l'heure.

On peut compter, ajoute M. Grouvelle, que la puissance d'une chaudière placée à la suite d'un four à puddler est de 16 à 18 chevaux, et que pour un générateur placé à la suite d'un four à réchauffer elle est de 25 à 30 chevaux. Cet auteur admet de plus que deux fours à réchauffer, travaillant en échantillons différents, donnent de la vapeur en quantité largement suffisante pour leur travail au laminoir, et que le four à puddler suffit également au travail du cinglage au marteau et au laminoir.

D'après MM. Thomas et Laurens, sur un feu d'affinerie marchant au charbon de bois, et produisant de 22 à 24 tonnes de fer par mois, on peut placer une chaudière à vapeur ayant 16 mètres carrés de surface de chauffe, et produire de 150 à 180 kilog. de vapeur à l'heure, même en plaçant entre le four à affiner et la chaudière un petit four destiné à commencer le chauffage de la fonte à affiner, ou à chauffer le fer à étirer.

302. *Chaudières chauffées par les gaz des hauts-fourneaux.* L'expérience prouve qu'en utilisant convenablement la chaleur perdue dans un haut-fourneau au bois, elle est plus que suffisante pour chauffer l'air d'injection à 300° et produire la vapeur nécessaire pour faire fonctionner la machine soufflante.

La composition des gaz sortant d'un haut-fourneau au charbon de bois est, d'après M. Bunten, de 2,32 d'hydrogène, 0,66 d'hydrogène protocarboné, 32,59 d'oxyde de carbone, 3,49 d'acide carbonique et 60,94 d'azote. En supposant que les gaz combustibles ne soient composés que d'oxyde de carbone, leur combustion complète développerait une quantité de chaleur égale aux 0.80 de celle qui correspond au combustible introduit dans le haut-fourneau.

D'après MM. Thomas et Laurens, une machine à vapeur à détente et condensation, de la force de 18 chevaux, dont la chaudière était chauffée par les gaz d'un haut-fourneau au bois, a donné de bons résultats, la section de la cheminée et des carneaux étant de 28 décimètres carrés, la hauteur de la cheminée 8 mètres, et la surface de chauffe calculée sur une production de 15 à 17 kilog. de vapeur à l'heure par mètre carré.

La combustion des gaz sortant d'un haut-fourneau au coke peut facilement produire la vapeur nécessaire à la machine soufflante (209).

303. *Épaisseur théorique des chaudières à vapeur.* L'effort qui tend à rompre une chaudière à vapeur suivant une génératrice, par millimètre de longueur, est exprimé par $\frac{pD}{2}$, et on a

$$\frac{pD}{2} = ef, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{pD}{2f}.$$

p pression de la vapeur en kilog., sur un millimètre carré de surface de chaudière (p est la différence des pressions à l'intérieur et à l'extérieur de la chaudière);
D diamètre de la chaudière en millimètres;
e épaisseur de la chaudière en millimètres;
f résistance à la traction du métal qui compose la chaudière, par millimètre carré de section (page 247).

Cette formule est la même que celle posée au n° 173 pour les tuyaux de conduite des eaux; seulement la hauteur h en mètres d'eau est exprimée en kilogrammes sur un millimètre carré de surface, ce qui donne $p = \frac{h \times 10}{10000} = \frac{h}{1000}$; le diamètre de la chaudière D est exprimé en millimètres au lieu de l'être en mètres, ce qui donne $D = d \times 1000$, et R est représenté par f.

L'effort qui tend à rompre une chaudière suivant un grand cercle des demi-sphères qui la terminent est $\frac{pD}{4}$, et on a

$$\frac{pD}{4} = ef, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{pD}{4f}.$$

304. *Ordonnance des 22 et 23 mai 1843 relatives aux appareils à vapeur.* Ces ordonnances sont relatives à la *fabrication des chaudières à vapeur et à leur établissement*, c'est-à-dire à leur autorisation, aux épreuves qu'elles doivent subir, à leur épaisseur, à leurs appareils de sûreté (soupapes, manomètres, appareils d'alimentation, indicateurs de niveau), à leur emplacement, et à la surveillance administrative des machines à vapeur. Ces ordonnances comprennent en outre les dispositions relatives à l'établissement des machines employées dans l'intérieur des mines, et celles relatives à l'emploi des machines à vapeur locomobiles et locomotives (quatrième partie).

Ce qui va suivre sur les chaudières à vapeur est extrait en grande partie de ces ordonnances.

305. *Épaisseur pratique à donner aux chaudières à vapeur en tôle et en cuivre.* Cette épaisseur se détermine à l'aide de la formule

$$e = 1{,}8d\,(n - 1) + 3, \quad \text{d'où} \quad n = 1 + \frac{e - 3}{1{,}8d}.$$

e épaisseur de la chaudière en millimètres;
d diamètre de la chaudière en mètres;
n tension absolue de la vapeur dans la chaudière, ou n° du timbre; la pression effective en atmosphères est $n - 1$.

De la formule précédente on conclut les épaisseurs e à donner aux chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé, consignées dans le tableau suivant.

DIAMÈTRES des chandières.	NUMÉROS DES TIMBRES exprimant les tensions absolues de la vapeur dans la chaudière						
	2 atmosph.	3 atmosph.	4 atmosph.	5 atmosph.	6 atmosph.	7 atmosph.	8 atmosph.
mèt.	millim.	millim.	millim.	millim	millim.	millim.	millim.
0.50	3.90	4.80	5.70	6.60	7 50	8.40	9.30
0.55	3.99	4.98	5.97	6.96	7.95	8.94	9.93
0.60	4.08	5.16	6.24	7.32	8.40	9.48	10.56
0.65	4.17	5.34	6 51	7.68	8.85	10.02	11.19
0.70	4.26	5.52	6.78	8.04	9.30	10.56	11.82
0.75	4.35	5.70	7.05	8.40	9.75	11.10	12.45
0.80	4.44	5.88	7.32	8.76	10.20	11.64	13.08
0.85	4.53	6.06	7.59	9.12	10.65	12.18	13.71
0.90	4.62	6.24	7.86	9.48	11.10	12.72	14.34
0.95	4.71	6.42	8 13	9.84	11.55	13.26	14.97
1.00	4.80	6.60	8.40	10.20	12.00	13.80	15.60

L'épaisseur de la tôle ou du cuivre laminé ne doit d'ailleurs jamais dépasser 15 millimètres; si, en raison du diamètre projeté de la chaudière et de la tension de la vapeur, une épaisseur plus forte était nécessaire, le fabricant devrait substituer à une chaudière unique plusieurs chaudières séparées, de diamètres plus petits.

Lorsqu'une partie de la chaudière sera plane, l'épaisseur de cette partie devra être augmentée.

L'ordonnance n'assigne pas de règle pour l'épaisseur des chaudières en fonte; mais, d'après l'instruction annexée aux ordonnances (304), on doit considérer comme suspecte, toute chaudière en fonte de forme cylindrique dont l'épaisseur ne serait pas égale à 5 fois l'épaisseur prescrite pour la même chaudière en tôle ou en cuivre laminé.

Comme dans le commerce on ne trouve pas des tôles de toutes les épaisseurs, les constructeurs des chaudières ne font usage que de tôles d'un certain nombre d'épaisseurs, mais toujours supérieures à celles que prescrivent les ordonnances. M. Péclet rapporte, dans son *Traité de la chaleur*, les proportions de chaudières du tableau suivant, usitées dans un des principaux établissements de chaudronnerie de Paris, pour une pression de 5 atmosphères.

NOMBRE de chevaux.	LONGUEUR de la chaudière.	LONGUEUR de chacun des deux bouilleurs.	DIAMÈTRE de la chaudière.	DIAMÈTRE des bouilleurs.	ÉPAISSEUR de la tête de la chaudière.	ÉPAISSEUR de la tête des bouilleurs.
	m.	m.	m.	m.	millimèt.	millimèt.
2	1.65	1.75	0.66	0.28	8	8
4	2.10	2.20	0.70	0.30	8	8
6	2.45	2.60	0.75	0.35	9	10
8	2.80	2.95	0.80	0.35	10	10
10	3.25	3.40	0.80	0.35	10	10
15	5.00	5.15	0.80	0.44	10	10
20	6.80	7.00	0.85	0.50	10	10
25	8.50	8.65	0.85	0.50	10	10
30	9.20	9.50	1.00	0.60	10.5	10
40	10.00	10.38	1.10	0.60	11	10

Sauf les deux premières chaudières de ce tableau, qui ont des surfaces de chauffe trop grandes, les autres ont des surfaces de chauffe de 1mc,70 environ par force de cheval. Supposant que la consommation est de 5 kilog. de houille par force de cheval et par heure, et que chaque kilog. de houille produit 5 kilog. de vapeur, il en résulte que chaque mètre carré de surface de chauffe ne donne que 15 kilog. de vapeur à l'heure (299).

Une circulaire ministérielle adressée aux préfets, en date du 22 mars 1853, prohibe à l'avenir l'usage des calottes en fonte pour former l'extrémité des bouilleurs qui est en contact avec la flamme ou les gaz provenant de la combustion. L'emploi de la fonte ne peut être permis que pour la fermeture autoclave de l'extrémité extérieure et apparente des bouilleurs et pour les tubulures qui réunissent les bouilleurs au corps des chaudières.

306. *Épreuves des chaudières à vapeur.* Aucune chaudière à vapeur ne peut être mise en activité dans un établissement quelconque, sans avoir été préalablement essayée, à l'aide d'une pompe foulante à eau, à une pression triple de la pression effective $n - 1$ (n° 305), pour les chaudières, tubes bouilleurs et réservoirs en tôle ou en cuivre laminé, et quintuple pour les chaudières ou tubes bouilleurs en fonte.

Les cylindres en fonte des machines à vapeur et les enveloppes en fonte de ces cylindres sont éprouvés à une pression triple de la pression effective.

Aucune machine ou chaudière à vapeur ne peut être livrée par un fabricant, si elle n'a été soumise aux épreuves précédentes; ces épreuves sont faites à la fabrique, sur la déclaration des fabricants et d'après les ordres des préfets, par les ingénieurs des mines, ou, à leur défaut, par les ingénieurs des ponts et chaussées. L'épreuve est recommencée sur l'établissement dans lequel les machines ou chaudières doivent être employées : 1° si le propriétaire la réclame; 2° s'il y a eu,

pendant le transport ou lors de la mise en place, des avaries notables ; 3° si des modifications ou opérations quelconques ont été faites depuis l'épreuve opérée à la fabrique.

Les chaudières ou machines à vapeur venant de l'étranger doivent être pourvues des mêmes appareils de sûreté que les machines ou chaudières d'origine française, et subir les mêmes épreuves. Ces épreuves sont faites au lieu désigné par le destinataire, dans la déclaration qu'il doit faire à l'importation.

Une circulaire aux préfets, en date du 6 janvier 1852, porte ce qui suit :

« Il peut y avoir des cas où l'épreuve faite seulement à la pression double soit suffisante : par exemple pour les chaudières à double fond dans lesquelles l'espace occupé par la vapeur est très-petit, et lorsque, d'ailleurs, ces chaudières sont bien établies et qu'il est reconnu qu'eu égard à leur disposition une déchirure du métal, si elle avait lieu, n'aurait que des conséquences peu graves.

» Mais cette épreuve à la pression double ne doit être qu'une exception. En thèse générale, tout récipient où la vapeur ne s'échappe pas librement dans l'atmosphère doit être éprouvé à la pression triple : tels sont les cylindres sécheurs, les retours d'eau et une foule d'autres récipients où la vapeur n'est pas à échappement parfaitement libre. »

307. *Autorisation pour l'établissement des machines à vapeur et des chaudières à vapeur.* Les machines à vapeur et les chaudières à vapeur, tant à haute qu'à basse pression, qui sont employées à demeure partout ailleurs que dans les mines, ne peuvent être établies qu'en vertu d'une autorisation délivrée par le préfet du département, conformément à ce qui est prescrit par le décret du 15 octobre 1810 pour les établissements insalubres et incommodes de 2e classe. (*Voir* ce décret à la fin de la 2e partie.)

La demande en autorisation est adressée au préfet. Elle fait connaître :

1° La pression maximum de la vapeur, exprimée en atmosphères et en fractions décimales d'atmosphère, sous laquelle les machines à vapeur ou les chaudières à vapeur doivent fonctionner ;

2° La force de ces machines, exprimée en chevaux (35);

3° La forme des chaudières, leur capacité et celle de leurs tubes bouilleurs, exprimées en mètres cubes ;

4° Le lieu et l'emplacement où elles doivent être établies, et la distance où elles se trouveront des bâtiments appartenant à des tiers et de la voie publique ;

5° La nature du combustible que l'on emploiera ;

6° Enfin le genre d'industrie auquel les machines ou les chaudières devront servir.

Un plan des localités et le dessin géométrique de la chaudière sont joints à la demande.



Le préfet renvoie immédiatement la demande en autorisation, avec les plans, au sous-préfet de l'arrondissement, pour être transmise au maire de la commune, qui procède immédiatement à des informations de *commodo* et *incommodo;* la durée de cette enquête est de dix jours; cinq jours après qu'elle est terminée, le maire adresse le procès-verbal de l'enquête, avec son avis, au sous-préfet, lequel, dans un semblable délai, transmet le tout au préfet, en y joignant également son avis. Dans le délai de quinze jours, le préfet, après avoir pris l'avis de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, statue sur la demande en autorisation.

Le recours au conseil d'État est ouvert au demandeur contre la décision du préfet qui aurait refusé d'autoriser l'établissement d'une machine ou chaudière à vapeur.

308. *Soupapes de sûreté.* Il est adapté à la partie supérieure de chaque chaudière deux soupapes de sûreté, une vers chaque extrémité de la chaudière (296). Chaque soupape est chargée d'un poids unique agissant, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un levier. Chaque poids reçoit l'empreinte d'un poinçon. Dans le cas où il est fait usage de leviers, ils doivent également être poinçonnés. La quotité des poids et la longueur des leviers sont fixés par l'arrêté d'autorisation du préfet.

La charge maximum de chaque soupape de sûreté est déterminée en multipliant $1^k,033$ par le nombre d'atmosphères mesurant la pression effective (305), et par le nombre de centimètres carrés mesurant l'orifice de la soupape.

La largeur de la surface annulaire de recouvrement ne doit pas dépasser la trentième partie du diamètre de la surface circulaire exposée directement à la pression de la vapeur, et cette largeur, dans aucun cas, ne doit excéder deux millimètres.

Le diamètre de la partie exposée directement à la vapeur étant, en millimètres,

20 25 30 35 40 45 50 55 60 et au-dessus,

la largeur maximum en millimètres de la surface annulaire de contact est respectivement

0,67 0,83 1,00 1,17 1,32 1,50 1,67 1,83 2,00.

Le diamètre des soupapes de sûreté est donné par la formule

$$d = 2,6\sqrt{\frac{s}{n - 0,412}}. \qquad (a)$$

d diamètre de la soupape en centimètres;
s surface de chauffe de la chaudière, y compris les parties de parois situées dans les carneaux ou conduits de la flamme et de la fumée, exprimée en mètres carrés;
n numéro du timbre (305).

De la formule précédente on conclut, pour les diamètres des soupapes, les résultats du tableau suivant.

SURF. DE CHAUFFE des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES indiquant les tensions absolues de la vapeur dans les chaudières.									
	1 ½ atmos.	2 atmos.	2 ½ atmos.	3 atmos.	3 ½ atmos.	4 atmos.	4 ½ atmos.	5 atmos.	5 ½ atmos.	6 atmos.
m.car.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.
1	2.493	2.063	1.799	1.616	1.479	1.372	1.286	1.214	1.152	1.100
2	3.525	2.918	2.544	2.286	2.092	1.941	1.818	1.716	1.630	1.655
3	4.317	3.573	3.116	2.799	2.563	2.377	2.227	2.102	1.996	1.905
4	4.985	4.126	3.598	3.232	2.959	2.745	2.572	2.427	2.305	2.200
5	5.574	4.613	4.023	3.614	3.308	3.069	2.875	2.714	2.578	2.459
6	6.106	5.054	4.407	3.958	3.624	3.362	3.149	2.973	2.823	2.694
7	6.595	5.458	4.760	4.276	3.914	3.631	3.402	3.211	3.045	2.910
8	7.050	5.835	5.089	4.571	4.185	3.882	3.637	3.433	3.260	3.111
9	7.478	6.189	6.398	4.848	4.438	4.117	3.857	3.641	3.458	3.299
10	7.882	6.524	5.690	6.110	4.679	4.340	4.066	3.838	3.645	3.478
11	8.267	6.843	5.967	6.360	4.907	4.552	4.265	4.025	3.823	3.648
12	8.635	7.147	6.233	5.598	5.125	4.754	4.454	4.204	3.993	3.810
13	8.987	7.439	6.487	5.827	5.334	4.949	4.636	4.376	4.156	3.965
14	9.325	7.720	6.732	6.047	6.536	5.138	4.811	4.541	4.312	4.124
15	9.654	7.990	6.968	6.259	5.730	5.316	4.980	4.701	4.464	4.259
16	9.970	8.253	7.197	6.464	5.918	5.490	5.143	4.854	4.610	4.399
17	10.277	8.506	7.418	6.663	0.100	5.659	6.302	5.004	4.752	4.534
13	10.575	3.753	7.633	6.841	6.277	5.823	5.455	5.149	4.890	4.666
19	10.865	8.993	7.842	7.044	6.449	5.982	5.605	5.290	6.024	4.794
20	11.147	9.227	8.046	7.227	6.616	6.133	5.750	5.428	5.154	4.918
21	11.423	9.454	8.245	7.380	6.780	6.289	5.892	6.561	5.282	5.040
22	11.691	9.677	8.439	7.580	6.939	6.437	6.031	5.692	5.406	5.158
23	11.954	9.894	8.629	7.750	7.095	6.582	6.167	5.820	5.527	5.274
24	12.211	10.107	8.814	7.917	7.248	6.723	6.299	5.845	5.646	5.388
25	12.463	10.316	8.996	8.080	7.397	6.862	6.429	6.069	6.763	5.499
26	12.710	10.520	9.174	3.240	7.544	6.998	6.556	6.188	5.877	5.608
27	12.952	10.720	9.349	8.397	7.776	7.132	6.681	6.306	5.989	5.715
28	13.190	10.917	9.520	8.551	7.828	7.262	6.804	6.422	6.099	5.819
29	13.423	11.110	9.689	8.703	7.967	7.391	6.924	6.535	6.207	5.922
30	13.653	11.300	9.855	8.851	8.103	7.517	7.043	6.648	6.313	6.024

L'expérience a fait voir qu'une seule soupape, dont l'orifice avait un diamètre déterminé par la formule empirique précédente, suffisait pour débiter toute la vapeur qui pourrait se former dans la chaudière, à la tension de *n* atmosphères, sous l'influence du feu le plus actif. Ainsi, quand une chaudière sera munie de deux soupapes ayant les dimensions prescrites et fonctionnant bien, on n'aura point à craindre

que la tension de la vapeur dépasse la limite assignée, sauf peut-être le cas où l'eau, par suite d'un défaut d'alimentation, parviendrait à atteindre des parois rouges.

« Une circulaire du ministre aux préfets, en date du 5 mars 1852, prescrit de placer les soupapes des cylindres sécheurs, non pas sur les tuyaux d'amenée de la vapeur, mais bien sur des renflements ou réservoirs intermédiaires pratiqués à cet effet près des embranchements qui conduisent la vapeur aux cylindres, et ayant une capacité de 25 litres au moins. Le diamètre des soupapes des cylindres sécheurs se calcule à l'aide de la formule précédente (*a*), dans laquelle *s* représente la surface de chauffe du générateur, *n* la pression absolue en atmosphères, que la vapeur ne doit pas dépasser dans les cylindres, et *d* le diamètre de la soupape en centimètres.

» Il est cependant de certains cas où l'on peut s'écarter de cette règle, celui, par exemple, où il est bien démontré, d'après la disposition de l'ensemble de l'appareil, que la vapeur débitée par la chaudière ne pourra se rendre qu'en partie dans les cylindres sécheurs. »

Les nouvelles ordonnances (304) dispensent de munir les chaudières à vapeur de plaques fusibles, ce qui était exigé avant leur promulgation.

309. *Manomètres.* Toute chaudière à vapeur doit être munie d'un manomètre à mercure, gradué en atmosphères et en fractions décimales d'atmosphères, de manière à faire connaître immédiatement la tension de la vapeur dans la chaudière. Le tuyau qui amène la vapeur au manomètre est adapté directement sur la chaudière, et non sur le tuyau de prise de vapeur ou sur tout autre tuyau dans lequel la vapeur est en mouvement.

Le manomètre doit être placé en vue du chauffeur.

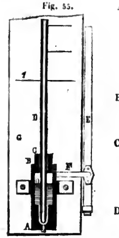
Le manomètre doit être à air libre, c'est-à-dire ouvert par le haut, toutes les fois que la pression effective (305) ne dépasse pas 4 atmosphères.

Pour les chaudières de la 4ᵉ catégorie (311), le manomètre est toujours à air libre.

Une ligne, tracée d'une manière apparente sur l'échelle de chaque manomètre, indique le niveau que le mercure ne doit pas dépasser.

La fig. 55 est la coupe, à l'échelle de 1/5, d'un manomètre à air libre, à cuvette, et à tube en verre.

Fig. 55.



A cuvette en fer forgé ; elle est formée d'un prisme en fer à base carrée de $0^m,06$ de côté, ayant $0^m,17$ de hauteur. On a foré, suivant l'axe du prisme, une cavité cylindrique de $0^m,04$ de diamètre et de $0^m,106$ de profondeur ; au fond de cette cavité s'en trouve une autre d'un diamètre moindre, dans laquelle pénètre l'extrémité du tube manométrique.

B plaque en fer carrée fermant la cuvette, sur le haut de laquelle elle est fixée par quatre vis ; le joint est fait à l'aide d'un peu de mastic de minium interposé entre les surfaces de contact.

C bouchon en fer vissé dans la plaque B. Ce bouchon est percé d'un trou dont le diamètre est un peu supérieur à celui du tube en verre qu'il doit recevoir. Vers le bas ce trou est rétréci pour retenir le mastic qui doit sceller le tube dans le bouchon C.

D tube en cristal, de $0^m,003$ de diamètre intérieur et de $0^m,009$ à $0^m,01$ de diamètre extérieur, dont la longueur dépend du maximum de pression que le manomètre doit mesurer.

E tube en fer creux de 0^m, 015 de diamètre intérieur, fermé supérieurement et inférieurement par des bouchons à vis en fer.

F petit tuyau courbé établissant la communication entre le bas du tube E et la cuvette A, immédiatement au-dessous du bouchon C. Un tuyau analogue, mais suffisamment long, établit de même la communication entre le haut du tube E et la chaudière.

G madrier en sapin portant l'échelle, et auquel est fixé tout l'appareil.

Cet instrument doit être rempli de mercure et monté sur place. Le madrier étant fixé à un mur vertical, avant de mettre le tube D en place, on verse le mercure dans la cuvette, jusqu'à ce qu'il ait atteint un niveau O, tel que quand la pression sera maximum, la surface du mercure couvre encore d'un demi-centimètre au moins le haut de la partie rétrécie de la cavité de la cuvette. On met alors en place le tube D, en tenant son extrémité à 4 ou 5 millim. du fond de la cavité de la cuvette, et on le fixe au madrier G par des brides légères, en ayant soin d'interposer un peu de coton entre le tube et le madrier. On lute ensuite le tube au bouchon C, en ayant soin, pendant cette opération, d'échauffer ce dernier en le tenant entre des tenailles de forge portées au rouge sombre.

L'opération terminée et l'appareil refroidi, on remplit complétement le tube E d'eau, qui s'introduit également dans toute la partie restée vide de la cuvette, et on visse le bouchon qui ferme le haut du tube E.

La pression de la colonne d'eau a fait monter le mercure dans le tube en cristal jusqu'à un certain niveau, qui est le point de départ de l'échelle, et où l'on marque une atmosphère. A partir de ce point, on divise le madrier sur sa hauteur, en parties égales, dont chacune représente 1/10 d'atmosphère.

Désignant par h l'intervalle de deux divisions, en négligeant la variation du niveau O dans la cuvette, on aurait

$$h = 0^{m},076.$$

Mais pendant que le niveau du mercure s'élève de h dans le tube D, il s'abaisse de $h \dfrac{\frac{1}{4}\pi d^2}{\frac{1}{4}\pi(\delta^2 - d'^2)}$ dans la cuvette; on a donc, en négligeant l'influence de l'eau qui remplace le mercure dans la cuvette,

$$0^{m},076 = h + h\,\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2}, \quad \text{d'où} \quad h = 0^{m},076\,\frac{\delta^2 - d'^2}{\delta^2 - d'^2 + d^2}.$$

d diamètre intérieur du tube en cristal D;
d' diamètre extérieur *id.*
δ diamètre de la cavité de la cuvette A.

Comme, par suite de la condensation de la vapeur, le tube E reste constamment plein, et que l'eau qui remplace le mercure dans la cuvette tend à augmenter h, on a donc en réalité

$$0^{m},076 = h + h\,\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2} - h\,\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2} \times \frac{1}{13,596}.$$

ou sensiblement

$$0^{m},076 = h\,\frac{27(\delta^2 - d'^2) + 25d^2}{27(\delta^2 - d'^2)}, \quad \text{d'où} \quad h = 0^{m},076\,\frac{27(\delta^2 - d'^2)}{27(\delta^2 - d'^2) + 25d^2}. \qquad (a)$$

13,596 densité du mercure; dans la formule on a fait $13,596 \times 2 = 27$.

Pour $\delta = 0^{m},04$, $d' = 0^{m},01$ et $d = 0^{m},005$, on a

$$h = 0^{m},076\,\frac{27(0,04^2 - 0,01^2)}{27(0,04^2 - 0,01^2) + 25 \times 0,005^2} = 0^{m},0756.$$

Si le manomètre est composé de deux branches dans lesquelles il y a du mercure, sans cuvette, l'échelle se gradue encore à l'aide de la formule (a) dans laquelle δ représente le diamètre intérieur de la branche qui communique avec la chaudière, et où $d' = 0$, puisque le tube en verre ne plonge plus dans la capacité de diamètre δ.

Comme il est très-difficile d'obtenir des tubes très-réguliers sur une longueur aussi grande que l'exige un manomètre à air libre indiquant 5 à 6 atmosphères de pression, il convient, surtout pour les manomètres sans cuvette, de les graduer au moyen d'une pompe portant un manomètre étalon.

Lorsque le tube indicateur est en verre, on voit le niveau du mercure dans toutes ses positions; mais quand il est en fer, on est obligé d'indi-

quer la pression au moyen d'un flotteur équilibré par un contre-poids, à l'aide d'un fil très-flexible passant sur une petite poulie très-mobile.

Pour graduer l'échelle d'un manomètre à air comprimé (fig. 56), on se sert de la formule

Fig. 56.

$$P = 2h + 0{,}76\,\frac{H}{H-h}, \qquad \text{(Int., 1278)}$$

d'où (Int., 458)

$$h = \frac{P}{4} + \frac{H}{2} - \sqrt{\left(\frac{P}{4} + \frac{H}{2}\right)^2 - H\,\frac{P-0{,}76}{2}}.$$

P pression absolue de la vapeur, en hauteur de mercure;
H = AD longueur de tube occupée par l'air sous la pression atmosphérique $0^m,76$;
h = DD' quantité dont H se comprime quand la pression passe de $0^m,76$ à P ; c'est la moitié de la différence de niveau du mercure dans les deux branches, qu'on suppose avoir même diamètre.

Donnant a P différentes valeurs, on en conclura les valeurs correspondantes de h. Pour P = 5 *atmos.* = $3^m,80$ de mercure, supposant H = $0^m,60$, on conclut de la dernière formule $h = 0^m,443$. Comme vérification, en substituant cette valeur de h dans la première formule, on en conclurait bien P = $3^m,80$.

Manomètre métallique de M. E. Bourdon. Ce manomètre, entièrement métallique et sans mercure, est basé sur ce principe : lorsqu'un tube métallique est enroulé en hélice, toute augmentation de pression intérieure ou dimunition de pression extérieure le déroule, et au contraire toute diminution de pression intérieure ou augmentation de pression extérieure l'enroule davantage. Aussi M. Bourdon construit-il également des baromètres d'après ce principe.

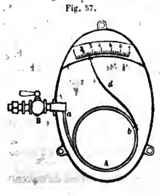


Fig. 57.

La fig. 57 représente le manomètre de M. Bourdon. Le tube A est en laiton bien homogène; sa longueur est de $0^m,70$, et sa section est une ellipse ayant 11 et 4 millimètres pour axes; il est enroulé dans le sens de son petit axe sur un peu moins de deux spires. Son extrémité a est fixée à une tubulure à robinet B qui permet de le mettre en communication avec la chaudière ou le récipient dont le manomètre doit indiquer la pression intérieure. L'extrémité b est fermée et tout à fait libre;

elle porte une aiguille *d* qui se meut sur un cadran que l'on a gradué en atmosphères et fractions d'atmosphères à l'aide d'un manomètre étalon à air libre, en faisant fonctionner l'appareil avec de l'air comprimé. Le tout est renfermé dans une caisse en fonte qui préserve l'appareil des chocs et permet de le fixer où l'on veut.

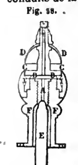
Ce manomètre est très-portatif, peu volumineux, nullement fragile, et il ne coûte que 50 fr. Toutes les locomotives en sont munies aujourd'hui.

L'administration a commandé à M. Bourdon des *manomètres vérificateurs*, gradués jusqu'à 18 atmosphères, et le 26 août 1852 elle en a adressé à tous les ingénieurs chargés de la surveillance des appareils à vapeur, pour leur servir à vérifier les différents instruments manométriques employés sur les chaudières.

310. *Alimentation des chaudières à vapeur. Indicateur du niveau de l'eau dans ces chaudières.* Toute chaudière à vapeur doit être munie d'une pompe d'alimentation bien construite et en bon état d'entretien ou de tout autre appareil alimentaire d'un effet certain.

Le niveau que l'eau doit avoir habituellement dans chaque chaudière est indiqué à l'extérieur par une ligne tracée d'une manière apparente sur le corps de la chaudière ou sur le parement du fourneau. Cette ligne, que nous appellerons *ligne de niveau d'eau*, est d'un décimètre au moins au-dessus de la partie la plus élevée des carneaux, tubes ou conduits de la flamme et de la fumée dans le fourneau.

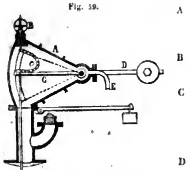
Fig. 58.



Chaque chaudière est pourvue d'un sifflet d'alarme (*fig.* 58), qui se fixe à la chaudière à l'aide d'une bride que porte le manchon FF. La tige E descend dans la chaudière et porte un flotteur. Quand le niveau de l'eau baisse de $0^m,05$ au-dessous de la ligne de niveau d'eau, la tige E descend et permet à la vapeur de passer par le canal A; la vapeur du canal A se rend, par les trous BB, dans le canal annulaire II, d'où elle sort par la fente circulaire très-étroite CC, pour frapper les bords du timbre ou cloche renversée DD et produire un sifflement très-aigu. Le flotteur, qui est ordinairement une pierre de liais du poids de 25 kilog. environ, et la tige E sont équilibrés par un contre-poids; celui-ci ainsi que son levier, qui repose sur des couteaux, sont placés dans la chaudière.

La fig. 59 représente, à l'échelle de 1/6, la disposition adoptée par M. E. Bourdon, constructeur à Paris, pour le sifflet d'alarme, l'indicateur de niveau et la soupape de sûreté.

Fig. 59.



A boîte en fonte à nervures pour résister à la pression de la vapeur, fixée sur la chaudière par une bride à 5 boulons;

B sifflet d'alarme; la soupape qui le ferme est ramenée sur l'ouverture par un ressort à boudin;

C levier du flotteur; quand le niveau baisse, ce levier, par l'intermédiaire de la chaîne en cuivre *c*, système de Gall, très-flexible, fait baisser la soupape qui ferme le sifflet;

D levier du contre-poids du flotteur; il est monté sur l'axe du levier C, en dehors de la caisse, et il se prolonge latéralement à la caisse par une aiguille, qui indique par sa position le niveau dans la chaudière. Avec cette disposition, le flotteur, au lieu de vaincre directement le frottement de la tige *d* du flotteur dans le stuffenbox, comme cela a lieu ordinairement, le vainc par l'intermédiaire d'un levier, ce qui le rend plus sensible. M. Bourdon, en faisant l'axe du levier C à embase conique, qui s'applique contre l'intérieur de la caisse du côté qui porte le levier D, et en le poussant par son autre extrémité à l'aide d'une pointe conique qui se visse dans une plaque appliquée latéralement à la caisse, évite la boîte à étoupe; une simple rondelle de cuir, de feutre ou d'étoupe, forme le joint de cette plaque. La chaîne *c* doit être verticale quand elle ouvre la soupape du sifflet.

E tube établissant la communication entre la chaudière et le manomètre, ou servant à une prise quelconque de vapeur.

Outre le flotteur d'alarme, la chaudière est munie de l'un des trois appareils suivants : 1° un flotteur ordinaire d'une mobilité suffisante; 2° un tube indicateur en verre; 3° des robinets indicateurs convenablement placés à des niveaux différents. Ces appareils indicateurs doivent, dans tous les cas, être placés en vue du chauffeur (296).

Si plusieurs chaudières sont destinées à fonctionner ensemble, elles doivent être disposées de manière à pouvoir, au besoin, être rendues indépendantes les unes des autres. En conséquence, chaque chaudière doit être alimentée séparément, et être munie de tous les appareils de sûreté.

311. *Division des chaudières à vapeur en quatre catégories. Emplacement des chaudières à vapeur.* Exprimant en mètres cubes la capacité de la chaudière avec ses tubes bouilleurs, et en atmosphères la tension absolue de la vapeur dans la chaudière (305), et faisant le produit des deux nombres, *les chaudières sont dites de la première catégorie, si le produit est plus grand que 15; elles sont de la deuxième catégorie, si le produit surpasse 7 et n'excède pas 15; de la troisième, s'il est supérieur à 3 sans excéder 7, et enfin de la quatrième, s'il n'excède pas 3.*

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement, et s'il existe entre elles une communication quelconque,

directe ou indirecte, on prend, pour déterminer l'ordre de la catégorie, la somme des capacités de ces chaudières, y compris celles de leurs tubes bouilleurs.

Les chaudières à vapeur comprises dans la première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier. Néanmoins, pour laisser la faculté d'employer au chauffage des chaudières une chaleur qui autrement serait perdue, le préfet peut autoriser l'établissement des chaudières de la première catégorie dans l'intérieur d'un atelier qui ne fait pas partie d'une maison d'habitation. L'autorisation est portée à la connaissance de notre ministre des travaux publics.

Toutes les fois qu'il y a moins de 10 mètres de distance entre une chaudière de la première catégorie et les maisons d'habitation ou la voie publique, il est construit, en bonne et solide maçonnerie, un mur de défense de 1 mètre d'épaisseur. Ce mur de défense est, dans tous les cas, distinct du massif des fourneaux, et en est séparé par un espace libre de 30 centimètres de largeur au moins. Il doit également être séparé des murs mitoyens avec les maisons voisines.

Si la chaudière est enfoncée dans le sol, et établie de manière que sa partie supérieure soit à un mètre au moins en contre-bas du sol, le mur de défense n'est exigible que lorsqu'elle se trouve à moins de 5 mètres des maisons habitées ou de la voie publique.

Lorsqu'une chaudière de la première catégorie est établie dans un local fermé, ce local ne doit point être voûté; mais il doit être couvert d'une toiture légère n'ayant aucune liaison avec les toits des ateliers ou autres bâtiments contigus, et reposant sur une charpente particulière.

Les chaudières à vapeur comprises dans la deuxième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur d'un atelier, si toutefois cet atelier ne fait pas partie d'une maison d'habitation ou d'une fabrique à plusieurs étages. Si les chaudières de cette catégorie sont à moins de 5 mètres de distance, soit des maisons d'habitation, soit de la voie publique, il est construit de ce côté le mur de défense dont il vient d'être question pour les chaudières de la première catégorie.

A l'égard des terrains contigus non bâtis appartenant à des tiers, si, après l'autorisation donnée par le préfet pour l'établissement des chaudières de la première ou de la seconde catégorie, les propriétaires de ces terrains font bâtir dans les distances citées plus haut, ou si ces terrains viennent à être consacrés à la voie publique, la construction de murs de défense, tels qu'ils sont prescrits ci-dessus, peut, sur la demande des propriétaires desdits terrains, être imposée au propriétaire de la chaudière, par arrêté du préfet, sauf recours devant notre ministre des travaux publics.

L'autorisation donnée par le préfet pour les chaudières de la première et de la deuxième catégorie indique l'emplacement de la chau-

dière, et la distance à laquelle elle doit être placée par rapport aux habitations appartenant à des tiers et à la voie publique, et fixe, s'il y a lieu, la direction de l'axe des chaudières. Cette autorisation détermine la situation et les dimensions en hauteur et en largeur du mur de défense d'un mètre, lorsqu'il est nécessaire de l'établir. Dans la fixation de ces dimensions, on a égard à la capacité de la chaudière, au degré de tension de la vapeur, et à toutes les autres circonstances qui peuvent rendre l'établissement de la chaudière plus ou moins dangereux ou incommode.

Les chaudières de la troisième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur d'un atelier ne faisant pas partie d'une maison, sans que le mur de défense soit exigé.

Les chaudières de la quatrième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur d'un atelier quelconque, lors même que cet atelier fait partie d'une maison d'habitation. Dans tous les cas, les chaudières sont munies d'un manomètre à air libre (309).

Les fourneaux des chaudières à vapeur comprises dans la troisième et dans la quatrième catégorie sont entièrement séparés, par un espace vide de 50 centimètres au moins, des maisons d'habitation appartenant à des tiers.

Lorsque les chaudières établies dans l'intérieur d'un atelier ou d'une maison d'habitation sont couvertes, sur le dôme et sur les flancs, d'une enveloppe destinée à prévenir les déperditions de chaleur, cette enveloppe est construite en matériaux légers; si elle est en briques, son épaisseur ne doit pas dépasser un décimètre.

312. *Machines à vapeur employées dans l'intérieur des mines.* Les machines à vapeur employées à demeure dans l'intérieur des mines sont pourvues des appareils de sûreté prescrits dans les numéros précédents pour les machines fixes, et doivent subir les mêmes épreuves. Elles ne peuvent être établies qu'en vertu d'autorisations du préfet, délivrées sur le rapport des ingénieurs des mines. Ces autorisations déterminent les conditions relatives à l'emplacement, à la disposition et au service habituel des machines.

Les attributions données aux préfets des départements par les ordonnances des 22 et 23 mai (304), sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue du département de la Seine, et dans les communes de Saint-Cloud, Meudon et Sèvres, du département de Seine-et-Oise.

DISTILLATION.

313. La distillation a pour but de séparer une substance volatile d'une ou de plusieurs autres substances fixes, ou volatiles à des températures différentes.

Pour ce mode de vaporisation, les dimensions des chaudières dépendent de la quantité de vapeur à former dans un temps donné, de la température d'ébullition du liquide (264), de sa chaleur latente de vaporisation (263), et de sa capacité calorifique ainsi que de celle du résidu (260). De ces divers éléments on déduit aussi la quantité de combustible à brûler (275), et par suite la surface de la grille (294) et la section de la cheminée (288).

Les surfaces de chauffe nécessaires pour vaporiser, dans un même temps, un même poids d'un liquide quelconque et d'eau, sont dans le rapport des quantités de chaleur absorbées pour échauffer et vaporiser les deux liquides. Quand il y a plusieurs liquides à vaporiser à la fois, ce qui a lieu généralement, la quantité totale de charbon à brûler est égale à celle nécessaire pour vaporiser tous les liquides séparément, et amener le résidu à la température d'ébullition. La surface de chauffe est aussi égale à la surface que nécessiterait la vaporisation de tous les liquides en particulier et l'échauffement du résidu.

1er *exemple*. Soit à vaporiser, en une heure, 150 kilog. d'alcool pur à la température primitive de 0°.

La température d'ébullition de l'alcool sous la pression atmosphérique 0m,76 étant 78°,40, sa capacité calorifique 0,622, et sa chaleur latente de vaporisation 207, la quantité de chaleur nécessaire pour en vaporiser un kilogramme est

$$78,40 \times 0,622 + 207 = 256 \text{ unités},$$

c'est-à-dire à peu près les 4/10 de celle nécessaire pour vaporiser 1 kil. d'eau préalablement à 0° (263).

Un kilog. de houille vaporisant 6 kilog. d'eau, il vaporisera donc $6 \times \frac{10}{4} = 15$ kilog. d'alcool.

Un mètre carré de surface de chauffe vaporisant de 15 à 20 kilog. d'eau, il vaporisera donc de $15 \times \frac{10}{4} = 38$, à $20 \times \frac{10}{4} = 50$ kilog. d'alcool. En supposant seulement 38 kilog., les 150 kilog. d'alcool à 0° exigeront $\frac{150}{38} = 4^{mc},95$ de surface de chauffe, et la quantité de houille brûlée sera $\frac{150}{15} = 10$ kilog.

2e *exemple*. Soit à distiller en une heure 500 litres d'un vin dans lequel les quantités d'alcool et d'eau sont dans le rapport de 1 à 22.8.

L'expérience prouve que pour obtenir presque tout l'alcool, il faut vaporiser les 0,22 de la masse totale, ce qui donne 110 litres d'une liqueur composée de 21 litres d'alcool et de 89 litres d'eau.

La quantité de houille à brûler est alors :

Pour vaporiser les 0,792×21=16,63 kilog. d'alcool (44). $\frac{16.63}{15}$ = 1k,11

Pour vaporiser les 89 kilog. d'eau. . . . . $\frac{89}{6}$ = 14,83

Pour élever à 100° les 390 kilog. de résidu. . . . . $\frac{100 \times 390}{650 \times 6}$ = 10,00

Total. 25,94

25k,94 de houille pouvant vaporiser 25k,94 × 6 = 155k,64 d'eau, la surface de chauffe nécessaire pour distiller les 500 litres de vin sera donc de $\frac{155,64}{15}$ = 10mc,38.

L'eau-de-vie qui sert de boisson contient généralement de 50 à 60 pour cent en volume d'alcool pur, à la température de 15°; ce que dans le commerce on appelle *esprit* en contient de 70 à 80 pour cent, à la même température. Les vins du midi donnent plus d'eau-de-vie que ceux du nord; on en retire jusqu'à 1/3 des premiers, moyennement 1/4, au lieu que ceux du centre n'en donnent que 1/5, et ceux du nord seulement de 1/8 à 1/10.

Lorsqu'on distille une matière quelconque, on dépense une certaine quantité de chaleur pour l'amener à la température d'ébullition. Dans un grand nombre de cas, on peut obtenir cette élévation de température au moyen de la chaleur provenant de la condensation des vapeurs, ce qui constitue une véritable économie de combustible.

314. *Condensation des vapeurs.* On peut admettre: 1° que pour une même vapeur, la quantité condensée par une même surface est proportionnelle à la différence entre la température de la vapeur et celle de l'air ou de l'eau qui sert de réfrigérant; 2° que pour des vapeurs différentes, les quantités condensées, par une même surface et pour un même excès de température, sont en raison inverse des quantités de chaleur contenues dans un même poids des vapeurs (263).

TABLEAU de la quantité de vapeur d'eau condensée en une heure, par un mètre carré de surface de quelques matières en contact avec l'air à 15°, ou avec l'eau à 20 ou 25°.

NATURE DES SURFACES.	VAPEUR D'EAU CONDENSÉE PAR	
	l'air à 15°.	l'eau à 20 ou 25°.
	k.	k.
Fonte de 5 à 6 millimètres d'épaisseur. . . .	1.80	»
Cuivre de 2 à 3 millimètres d'épaisseur. . .	1.40	1.07
Fer-blanc.	1.07	»
Tôle.	1.82	»
Verre.	1.76	»

A l'aide de ce tableau, et en appliquant les deux lois qui le précèdent, on déterminera facilement la quantité d'une vapeur quelconque ou d'un mélange de plusieurs vapeurs, qui sera condensée par les surfaces du tableau, pour un excès de température donné.

ÉVAPORATION.

315. *Évaporation spontanée à l'air libre.* Cette évaporation, que l'on n'emploie guère que dans l'extraction du sel marin, est d'autant plus active : 1° que la surface des liquides est plus grande ; 2° que la température du liquide à évaporer et de l'air environnant ou de l'un de ces deux corps seulement est plus grande ; 3° que l'air est plus sec et plus rapidement renouvelé.

D'après M. Payen, dans les marais salants, en faisant usage de ce mode d'évaporation, l'extraction de 1000 kilog. de sel coûte de 6 à 25 fr., suivant les localités et les états de l'atmosphère. En évaporant l'eau à l'aide de la houille, comme l'eau de mer contient à peu près 0,025 de sel marin, pour obtenir 1000 kilog. de sel, il faudrait évaporer $\frac{1000}{0,025} \times 0,975 = 39000$ kilog. d'eau, qui exigeraient $\frac{39000}{5} = 7800$ kil. de houille. Supposant que l'hectolitre de houille de 80 kilog. coûte 3 fr. seulement, le combustible brûlé pour obtenir 1000 kilog. de sel coûterait déjà 292 fr. 50 cent.

316. *Évaporation par courant d'air forcé.* Ce genre d'évaporation ne s'emploie guère que pour la concentration des jus de fruits. Mongolfier en a fait usage le premier pour concentrer des marcs de raisin avant leur fermentation tout en leur conservant leurs principes fermentiscibles. Il résulte de ses observations, qu'en automne un mètre cube d'air dissout moyennement 3 grammes d'eau. Un homme, par un travail effectif journalier de 6 heures, pouvant, à l'aide d'une machine, imprimer une vitesse de 5 mètres par seconde à environ 70000 mètres cubes d'air, la quantité d'eau qu'il évaporera en un jour sera donc de $70000 \times 0,003 = 210$ kil. En diminuant de moitié la vitesse imprimée à l'air, on pourrait quadrupler la quantité d'air mise en mouvement et par là diminuer considérablement le prix de revient de ce mode d'évaporation.

317. *Évaporation à l'air libre et à l'aide d'un foyer.* Quelle que soit la température à laquelle un liquide se vaporise, on admet ordinairement que la quantité de chaleur absorbée par sa vaporisation est la même qu'à sa température d'ébullition ; mais, comme le remarque M. Péclet, la quantité de chaleur absorbée augmente rapidement à mesure que la température diminue, et cela, à cause de l'échauffement de l'air qui dissout la vapeur et du rayonnement.

***TABLEAU** de la quantité de chaleur contenue dans un mètre cube d'air saturé à différentes températures et sous la pression* $0^m.76$.

TEMPÉRATURE de l'air saturé.	TENSION de la vapeur (266).	TENSION de l'air (268).	POIDS de la vapeur (269).	POIDS de l'air (43 et 236)	CHALEUR de la vapeur (263).	CHALEUR de l'air (261).	CHALEUR totale.
	m.	m.	k.	k	unités.	unités.	unités.
20°	0.017	0.743	0.016	1.18	10	6.0	16.0
30	0.032	0.728	0.028	1.13	18	8.4	26.4
40	0.055	0.705	0.046	1.05	30	10.5	40.5
50	0.092	0.668	0.072	0.96	47	12.0	59.0
60	0.149	0.611	0.106	0.86	69	12.9	81.9
70	0.233	0.527	0.142	0.72	92	12.6	104.6
80	0.355	0.405	0.199	0.53	129	10.6	139.6
90	0.525	0.235	0.251	0.30	163	6.75	169.75

En admettant que la vapeur ne se dégage dans l'air que quand celui-ci s'en est saturé à la température du liquide ou de la vapeur, on déterminera facilement, au moyen du tableau précédent, les quantités de chaleur absorbées par la vaporisation d'un kilog. d'eau à différentes températures, y compris l'échauffement de l'air. La deuxième colonne du tableau suivant, *extrait du traité de la chaleur de M. Péclet*, donne ces quantités de chaleur; la troisième colonne donne les pertes dues au rayonnement, aussi pour un kilog. d'eau vaporisée, et la quatrième, les quantités totales de chaleur absorbées.

TEMPÉRATURES.	UNITÉS.	UNITÉS.	UNITÉS.
20°	1000	381	1381
30	942	331	1273
40	880	252	1132
50	819	185	1004
60	772	139	911
70	736	102	838
80	701	75	776
90	676	56	732

TABLEAU de la quantité totale de chaleur moyennement absorbée par l'évaporation d'un kilogramme d'eau à différentes températures, y compris le rayonnement et l'échauffement de l'air, d'après les expériences de M. Péclet.

TEMPÉRATURE.	CHALEUR ABSORBÉE.
	unités.
de 58°.25 à 55°.25	724
de 55 .25 à 52	780
de 52 à 48 .50	837
de 48 .50 à 44 .75	893
de 44 .75 à 40 .75	949
de 40 .75 à 36 .25	1063
de 36 .25 à 31 .25	1176

TABLEAU des poids de vapeur formés en une heure par un mètre carré de surface d'eau à différentes températures, dans un air calme.

TEMPÉRATURE.	POIDS D'EAU VAPORISÉ.	TEMPÉRATURE.	POIDS D'EAU VAPORISÉ.
	k.		k.
20°	0.32	60°	2.71
30	0.57	70	4.32
40	1.00	80	6.64
50	1.70	90	10.00

Dans les énormes chaudières employées aux salines de Dieuze, suivant que le liquide est en ébullition ou non, la houille brûlée pour obtenir 100 kilog. de sel est de 36 à 38 kilog. ou de 42 à 44 kilog. Les surfaces de grille et de chauffe sont à peu près le double de ce qu'elles seraient dans une chaudière à vapeur ordinaire pour une même consommation de combustible (294 et 299). La cheminée a une section supérieure à celle que donnerait la formule (*c*) (288) en négligeant la résistance, qui est très-faible, de la fumée avant son entrée dans la cheminée; elle a 18 mètres de hauteur sur 1 mètre de côté en bas, et 0m,60 en haut; elle est commune à quatre foyers qui consomment chacun 52 kilog. de houille à l'heure; la température de la fumée y est de 100°. Chaque kilog. de houille vaporise 7k,50 d'eau.

318. *Évaporation des liquides chauffés par la vapeur.* Lorsqu'on évapore un liquide dans un appareil à double fond dans lequel on fait arriver de la vapeur d'eau, on peut admettre que chaque mètre carré de surface peut condenser 3 kilog. de vapeur à l'heure pour une différence de température de 1 degré, et que pour les appareils en serpentin, cette condensation s'élève à 8 kilog., si le diamètre du serpentin est de

25 à 35 millimètres pour un développement qui ne dépasse pas 20 à 30 mètres.

Exemple. Soit à concentrer en une heure 5000 kilog. de clairce, c'est-à-dire de sirop avant la cuisson. Ce sirop, composé ordinairement de 30 parties d'eau pour 70 parties de sucre, pour être amené à 47° de l'aréomètre, degré ordinaire de concentration, perd à peu près 15 pour 100 d'eau; ce qui fait 750 kilog. pour 5000 kilog. de sirop. La température d'ébullition de la clairce étant 110° et sa chaleur spécifique moitié de celle de l'eau, la quantité de chaleur nécessaire pour en élever 5000 kilog. de 20° à 110° est $\frac{5000 \times 90}{2} = 225000$ unités; ce qui correspond à la chaleur dégagée par la condensation de $\frac{225000}{550} = 409^{k},1$ de vapeur d'eau (263). La quantité totale de vapeur à fournir pour élever la température de la clairce de 20° à 110°, et lui faire perdre 15 pour 100 d'eau, est donc $750 + 409,1 = 1159,1$ kilog.

Supposons maintenant que la vapeur soit à la température de 142°,70; ce qui correspond à 3,75 atmosphères de pression (266). Pendant que la clairce s'échauffe, l'excès moyen de la température moyenne de la vapeur et de l'eau de condensation, sur la température moyenne de la clairce, est

$$\frac{142,70 + 20 + 142,70 + 110}{4} - \frac{110 + 20}{2} = 38^{\circ},85.$$

Pendant l'évaporation, la différence des températures de la vapeur et du liquide étant à peu près 27°, la durée totale de l'évaporation est la même que s'il s'agissait de condenser $750 + \frac{27}{38,85}\,409,1 = 1034$ kilog. de vapeur avec une différence de température de 27°. En supposant que l'on condense dans des serpentins, la surface de chauffe sera donc $\frac{1034}{27 \times 8} = 4^{mc},79$, surface qui exige deux serpentins.

SÉCHAGE.

319. *Séchage à l'air libre.* Les dispositions à adopter pour les bâtiments destinés à ce mode de séchage, usité principalement dans les blanchisseries, consistent: 1° à placer ces bâtiments dans un lieu où rien n'empêche la circulation de l'air; 2° à leur donner une grande élévation, afin que les matières à sécher se trouvent dans un air plus sec et plus agité; 3° à laisser une libre circulation à l'air sur toutes les faces du bâtiment. Pour les séchoirs à colle, comme il serait dangereux d'y laisser pénétrer l'air chargé de vapeur, on garnit les ouvertures du bâtiment de jalousies que l'on ferme pendant les temps humides.

320. *Séchage produit par un courant d'air chauffé préalablement.* Tous les problèmes auxquels donne naissance ce mode de séchage pourront être résolus en suivant la marche que nous allons indiquer dans la solution des deux problèmes suivants, dont l'un est la réciproque de l'autre.

Premier problème. Soit à déterminer la quantité d'eau vaporisée par un kilogramme de houille, l'air saturé sortant du séchoir à 10°, et la température de l'air extérieur, supposé sec, étant 0°.

A la température de 10° et sous la pression 0m,76, un mètre cube d'air contient 0k,0095 de vapeur dont la force élastique est 0m,0095 de mercure, et dont la formation a absorbé $0{,}0095 \times 650 = 6{,}175$ unités de chaleur (269, 265 et 263). Un mètre cube d'air sec à 0° et sous la pression 0m,76 pesant 1k,3, à 10° et sous la même pression il pèse

$$\frac{1{,}3}{1 + 0{,}00367 \times 10} = 1^{k}{,}254. \qquad (43 \text{ et } 256)$$

Le poids de l'air contenu dans un mètre cube d'air saturé à 10° est alors

$$1{,}254\,\frac{0{,}7505}{0{,}76} = 1^{k}{,}238. \qquad (256 \text{ et } 268)$$

La température de l'air sec à l'entrée du séchoir est

$$10° + \frac{6{,}175 \times 4}{1{,}238} = 30°.$$

(4 étant le rapport approché des puissances calorifiques de l'eau et de l'air (261)).

Supposant que 1 kilogramme de houille produise 6000 unités de chaleur, il pourra élever $\frac{6000 \times 4}{30} = 800$ kilog. d'air de 0° à 30°, dont le volume en air saturé à 10° sera $\frac{800}{1{,}238} = 646{,}2$ mètres cubes; le poids d'eau vaporisé sera donc $646{,}2 \times 0{,}0095 = 6^{k}{,}139$.

Par des calculs semblables, supposant toujours l'air primitivement sec et à 0°, on trouverait que la quantité d'eau vaporisée par kilog. de houille croît sensiblement avec la température de l'air saturé; mais que pour un léger accroissement de cette température, celle de l'air à son entrée dans le séchoir augmente d'une quantité considérable.

Deuxième problème. Soit à évaporer 25 kilog. d'eau en une heure, la température de l'air saturé au sortir du séchoir étant 30° et la température de l'air saturé extérieur étant 15°.

Pour l'établissement des appareils destinés à opérer ce mode de séchage, il faut toujours se placer dans les conditions les plus défavorables d'état hygrométrique et de température de l'air extérieur; ainsi il convient de supposer cet air entièrement saturé, et à une température

supérieure à la température moyenne à laquelle il se trouvera pendant tout le temps que fonctionnera l'appareil. Dans le nord de la France, pour un appareil permanent, il convient de supposer l'air extérieur à 15° et complétement saturé.

A 30° et sous la pression 0m,76, un mètre cube d'air saturé contient 28,31 grammes d'eau, et à 15° il en contient 12,83 grammes (269). Par conséquent, en négligeant la dilatation de l'air en passant de 15° à 30°, chaque mètre cube dissoudra 15,68 grammes d'eau. Pour dissoudre les 25 kilog. il faudra donc à peu près $\frac{25}{0,01568} = 1594$ mètres cubes d'air; ce volume ramené de 30° à 0° devient $\frac{1594}{1+0,00367 \times 30} = 1436$ mètres cubes, dont le poids est $1436 \times 1,3 = 1867$ kilog.

La quantité de chaleur que perd l'air chaud pour dissoudre les 25 kil. d'eau est $650 \times 25 = 16250$ unités; sa température à l'entrée du séchoir est donc $30° + \frac{16250 \times 4}{1867} = 64°,8$.

La quantité totale de chaleur dépensée est

$$\frac{1867\,(64,8-15)}{4} = 23244.$$

Si l'air qui entre dans le séchoir a servi à la combustion, le poids de combustible à brûler s'obtient en divisant 23244 par la puissance calorifique du combustible; si au contraire l'air qui entre dans le séchoir n'a été chauffé qu'indirectement, il y a à peu près 20 pour 100 de la chaleur perdue (326), et le poids de combustible à brûler s'obtient en divisant 23244 par les 0,80 de la puissance calorifique. Ayant la quantité de combustible à brûler, on détermine la surface de la grille (294).

La formule générale (*c*) (288) peut, dans un grand nombre de cas, servir à calculer la section de la cheminée d'appel: quand, par exemple, la force ascensionnelle de l'air avant d'arriver au séchoir compense les frottements depuis le foyer jusqu'à la sortie du séchoir; car, alors, la cheminée d'appel ne fait plus qu'évacuer l'air du séchoir, et vaincre les frottements de cet air contre ses parois; cependant il convient d'augmenter la section que donne cette formule. Le plus souvent, on calcule la section de la cheminée d'appel de manière que la vitesse de l'air y soit de 2 mètres.

MM. Lacambre et Persac, dans une touraille continue construite à Louvain, ont établi, pour chauffer l'air, un calorifère dont la surface de chauffe est de 100 mètres carrés; il brûle en 12 heures 400 kilog. de houille, et il sèche par jour 50 hectolitres de malt, renfermant chacun de 27 à 36 kilog. d'eau; ce qui donne seulement une évaporation de 1k,1 à 2k,2 d'eau par kilog. de houille. Ce peu d'effet est dû à ce qu'il est

impossible de saturer complétement l'air dans le séchage des matières pulvérulentes.

321. *Séchage par l'air froid préalablement desséché.* Ce mode de dessiccation peut s'appliquer à la colle, qui ne peut supporter, lorsqu'elle est en gelée, qu'une température de 35° environ.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'obtenir 500 kilog. de colle sèche, l'air desséché étant à 10°. La colle en gelée contenant des 2/3 aux 5/6 de son poids d'eau, il faudra donc, en adoptant la proportion 2/3, qui est celle des colles communes, pour obtenir les 500 kilog. de colle sèche, évaporer 1000 kilog. d'eau; or, un mètre cube d'air saturé à 10° contenant 9g,5 d'eau (269), il faudra donc, pour dissoudre les 1000 kilog. d'eau, faire passer sur la colle $\frac{1000}{0,0095} = 105263$ mèt. cubes d'air sec.

Pour faire l'appel de ces 105263 mètres cubes d'air, il faudrait brûler environ 100 kilog. de houille, qui coûteraient 3 fr. à Paris; au moyen d'un ventilateur, cet appel pourrait coûter 4 fr. (292).

La perte sur la chaux employée à dessécher l'air ne peut qu'être faible, si on a soin de ne lui faire absorber que la moitié de son poids d'eau; car à cet état elle est encore propre aux constructions.

322. *Séchage des étoffes par le contact des surfaces métalliques.* Clément, en appliquant une pièce de calicot, pesant 2k,50 et contenant un égal poids d'eau, sur une plaque de cuivre d'une surface égale à la sienne, et chauffée par la vapeur à 100°, a obtenu sa dessiccation en une minute. Dans cette expérience, la quantité d'eau évaporée par mètre carré de surface de cuivre a été de 6k,94 par heure.

Dans les fabriques, on sèche les étoffes en les faisant passer sur des cylindres en fonte chauffés intérieurement par la vapeur.

D'après des expériences faites par M. Royer, vingt pièces de calicot sortant de la presse et pesant 150 kilog. ont été séchées en 3 heures 1/2; leur poids a été réduit à 76 kilog., et les 74 kilog. d'eau ont condensé 102 kilog. de vapeur; de sorte que, en admettant qu'un kilog. de houille produit 5 kilog. de vapeur, la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de houille a été de $5 \frac{74}{102} = 3^k,63$.

La machine était à un seul cylindre, l'eau de condensation était bouillante et la pression dans la chaudière était de 1m,37 de mercure (266).

CHAUFFAGE.

323. Avant de passer en revue les différents modes de chauffage, nous croyons devoir rapporter succinctement dans ce numéro les résultats obtenus par M. Péclet dans des expériences récentes (extrait du *Supplément à la seconde édition du traité de la chaleur*).

1° *Perte de chaleur due au rayonnement* (245). La température d'un corps restant constante et comprise entre 25° et 65°, et celle de l'enceinte taut de 12°, la quantité de chaleur émise par rayonnement par mètre carré et par heure est

$$R = kt(1 + 0{,}0056t). \qquad (1)$$

t excès constant de la température du corps sur celle de l'enceinte;
k nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et dont la valeur est indiquée au tableau suivant :

Argent poli.	0.13	Tôle oxydée.	3.36	Noir de fumée. . .	4.01
Papier argenté. . .	0.42	Fonte neuve.	3.17	Pierre à bâtir. . .	3.60
Laiton poli	0.24	Fonte oxydée. . . .	3.36	Plâtre.	3.60
Papier doré. . . .	0.23	Verre.	2.91	Bois.	3.60
Cuivre rouge. . . .	0.16	Craie en poudre. . .	3.32	Étoffes de laine. . .	3.68
Zinc.	0.24	Poussière de bois. .	3.53	Calicot.	3.65
Étain.	0.215	Charbon en poudre.	3.42	Étoffes de soie. . . .	3.71
Tôle polie.	0.45	Sable fin.	3.62	Eau.	5.31
Tôle plombée. . . .	0.65	Peinture à l'huile. .	3.71	Huile.	7.24
Tôle ordinaire. . .	2.77	Papier.	3.77		

Pour le papier et les étoffes la couleur est sans influence.

Pour des températures t' de l'enceinte qui ne différeraient de 12° que de quelques unités, on multiplierait les valeurs de k du tableau précédent par $1 + 0{,}0037\,(t' - 12)$.

D'après Dulong, la chaleur rayonnée est représentée par la formule

$$R = ma^{\theta}(a^{t} - 1). \qquad (2)$$

θ température de l'enceinte ;
t excès de la température du corps sur celle de l'enceinte;
a nombre constant égal à 1,0077;
m nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et que d'après les expériences de M. Péclet il convient de faire égal à 124.72 *k*.

Dulong a vérifié sa formule pour des excès de température s'élevant jusqu'à 260°, et M. Péclet conseille de l'employer toutes les fois que la température de l'enceinte différera notablement de 12° et quand l'excès de température ne sera pas compris entre 25° et 65°.

2° *Perte de chaleur due au contact de l'air.* Cette perte est indépendante de la nature de la surface du corps et de la température de l'enceinte; elle ne dépend que de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte, et de la forme et des dimensions du corps. Dans tous les cas elle est représentée, pour un excès de température compris entre 25° et 65°, pour un mètre carré et pour une heure, par la formule

$$A = k't(1 + 0{,}0075t). \qquad (3)$$

t excès constant de température;
k' nombre qui varie avec les formes et la dimension du corps, et qui est égal a

$1{,}778+\frac{0.13}{r}$ pour les corps sphériques de rayon r, à $2{,}058+\frac{0{,}0382}{r}$ pour les cylindres horizontaux de rayon r, à $\left(0{,}726+\frac{0{,}0345}{\sqrt{r}}\right)\left(2{,}43+\frac{0{,}8758}{\sqrt{h}}\right)$ pour les cylindres verticaux de rayon r et de hauteur h, et à $1{,}764+\frac{0{,}636}{\sqrt{h}}$ pour les surfaces planes verticales de hauteur h.

Dulong a donné la formule suivante pour exprimer la perte de chaleur due au contact de l'air

$$A = m't^{1,233}. \qquad (4)$$

t excès constant de température;
m' nombre que M. Péclet conseille de faire égal à 0.552 k'.

Cette formule de Dulong s'accorde parfaitement avec les expériences de M. Péclet, et comme elle a été vérifiée pour de grands excès de température, il y a lieu de l'employer toutes les fois que l'excès de température dépassera 65°.

3° *La perte totale de chaleur due au rayonnement et au contact de l'air* est donc, pour des excès t de température compris entre 25° et 65° et pour une température de l'enceinte très-peu différente de 12°,

$$M = R + A = kt\,(1 + 0{,}0056t) + k't\,(1 + 0{,}0075t). \qquad (5)$$

Ou, à très-peu près, pour les corps à surfaces ternes,

$$M = (k + k')\,t\,(1 + 0{,}0065t). \qquad (6)$$

Dans toutes les autres circonstances, on pourra poser

$$M = R + A = ma^{\theta}\,(a^{t} - 1) + m't^{1,233} \qquad (7)$$

Il résulte d'expériences faites sur une grande échelle, que la *chaleur transmise par un tuyau renfermé dans un canal parcouru par l'air* est sensiblement la même que celle que le tuyau perdrait à l'air libre (formules (5), (6) et (7), en prenant pour t l'excès de la température du tuyau sur la température moyenne de l'air qui parcourt le canal. Le rayonnement du cylindre échauffe la surface intérieure du canal, et l'air s'échauffe par son contact avec la surface de ce canal; ce qui fait que la chaleur acquise par l'air est égale à celle que perd le cylindre par contact et par rayonnement. Ce cas se présente dans un grand nombre de calorifères.

La section du canal n'ayant que peu ou point d'influence, si le tuyau circule dans une pièce à chauffer, la chaleur transmise conserve la même expression.

Lorsque l'air qui s'échauffe circule à l'intérieur du tuyau, circon-

stance qui se présente dans un grand nombre de calorifères à air chaud, le refroidissement du tuyau par rayonnement disparaît complétement, et on peut admettre, sans erreur sensible, que la quantité de chaleur transmise à l'air par le tuyau est égale à celle qui passerait dans l'air si le tuyau était exposé à l'air libre, formules (5), (6) et (7), dans lesquelles t représente, comme dans le cas précédent, l'excès de la température du cylindre sur la température moyenne de l'air à l'entrée et à la sortie.

4° *Transmission de la chaleur à travers les corps.* La quantité de chaleur qui traverse une plaque à surfaces planes et parallèles, est, par mètre carré et par heure,

$$M = (t - t')\frac{C}{E}. \qquad (8)$$

t et t' températures constantes des surfaces de la plaque ;
E épaisseur de la plaque ;
C est la valeur de M pour $t - t' = 1°$ et pour $E = 1$ mètre ; le tableau suivant donne cette valeur pour différents corps.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DENSITÉS.	VALEUR DE C.
1° *Matières continues, ou dont les parties sont agglomérées.*		
Cuivre	»	64.00
Fer	»	29.00
Zinc	»	28.00
Plomb	»	14.00
Charbon des cornues à gaz	1.61	4.96
Marbre gris à grains fins	2.68	3.48
Marbre blanc saccharoïde à gros grains	2.77	2.78
Pierre calcaire à grains fins	2.34	2.08
Id.	2.27	1.69
Id.	2.17	1.70
Pierre de liais à bâtir à gros grains	2.24	1.32
Id.	2.22	1.27
Plâtre ordinaire gâché	»	0.331
Plâtre ordinaire très-fin, gâché	1.25	0.520
Plâtre de moulage très-fin, gâché	1.25	0.44
Plâtre aluné, gâché	1.73	0.63
Terre cuite	1.98	0.69
Id.	1.85	0.51
Bois de sapin, transmission perpendiculaire aux fibres	0.48	0.093
Id. parallèle aux fibres	0.48	0.170
Bois de noyer, transmission perpendiculaire aux fibres	»	0.103
Id. parallèle aux fibres	»	0.174
Bois de chêne, transmission perpendiculaire aux fibres	»	0.211
Liége	0.22	0.143
Caoutchouc	»	0.170

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DENSITÉS.	VALEUR DE C.
Gutta-percha	»	0.172
Colle d'amidon	1.017	0.425
Verre	2.44	0.75
Id.	2.55	0.88
2° *Matières pulvérulentes.*		
Sable quartzeux	1.47	0.27
Brique pilée, gros grains	1.0	0.139
Brique pilée, passée au tamis de soie	1.16	0.165
Brique en poudre fine obtenue par décantation.	1.55	0.140
Craie en poudre un peu humide	0.92	0.108
Craie en poudre lavée et séchée	0.85	0.086
Craie en poudre lavée, séchée et comprimée	1.02	0.103
Fécule de pomme de terre	0.71	0.098
Cendres de bois	0.45	0.066
Poudre de bois d'acajou	0.31	0.065
Charbon de bois ordinaire en poudre	0.49	0.079
Braise de boulanger en poudre passée au tamis de soie	0.25	0.068
Charbon de bois ordinaire en poudre passée au tamis de soie	0.41	0.081
Coke pulvérisé	0.77	0.160
Limaille de fer	2.05	0.158
Bioxyde de manganèse	1.46	0.163
3° *Matières filamenteuses.*		
Coton en laine, quelle que soit sa densité	»	0.040
Molleton de coton, *id.*	»	0.040
Calicot neuf, *id.*	»	0.050
Laine cardée, *id.*	»	0.044
Molleton de laine, *id.*	»	0.024
Édredon, *id.*	»	0.039
Toile de chanvre neuve	0.54	0.052
Id. vieille	0.58	0.043
Papier blanc à écrire	0.85	0.043
Papier gris non collé	0.48	0.034

5° *Transmission de la chaleur à travers les murailles.* Ordinairement une des deux températures t et t' est inconnue; c'est ce qui arrive, par exemple, pour les murailles des édifices, lorsque, pour les différentes pièces, une seule face est exposée à l'air extérieur. La face intérieure opposée à celle exposée à l'air extérieur recevant le rayonnement de toutes les autres, toutes les surfaces intérieures ont une température peu différente de celle de l'air des pièces qu'elles forment; mais la température de la surface extérieure est nécessairement plus grande que celle de l'air extérieur, et elle ne peut être déterminée à l'aide d'un thermomètre. Alors il faut transformer la formule (8) en y remplaçant t' en fonction de la température de l'air extérieur. Mais comme en em-

ployant la formule (7) de Dulong l'élimination de t' serait impossible, et qu'en admettant les formules (5) et (6) on serait conduit à une équation du deuxième degré assez compliquée et d'un usage difficile, M. Péclet a admis la loi de Newton, qui est suffisamment exacte pour des petits excès de température, et il a posé

$$M = (k + k')(t' - T') \qquad (9)$$

T′ température de l'air extérieur.

Les équations (8) et (9) donnent

$$t' = \frac{Ct + (k + k')ET'}{C + (k + k')E} \quad \text{et} \quad M = \frac{C(k + k')(t - T')}{C + (k + k')E}. \qquad (10)$$

Si tous les murs sont exposés à l'air extérieur, comme dans les églises, par exemple, le rayonnement ne peut plus maintenir les faces intérieures à la température de l'air qu'elles renferment; alors il faut encore remplacer dans l'équation (10), t en fonction de la température de l'air intérieur. Comme on peut poser

$$M = k'(T - t) \qquad (11)$$

T température de l'air intérieur.

Les formules (10) et (11) donnent

$$t = \frac{(k + k')(Ek'T + CT') + Ck'T}{C(2k' + k) + Ek'(k + k')} \quad \text{et} \quad M = \frac{k'C(k + k')(T - T')}{C(2k' + k) + Ek'(k + k')}. \qquad (12)$$

Cette nouvelle valeur de M est beaucoup plus petite que quand on suppose que les surfaces intérieures sont à la température de l'air intérieur, égalité que l'on ne peut admettre que quand une très-petite partie de muraille est exposée à l'air extérieur.

Pour des murs de 10 mètres de hauteur en pierre calcaire, pour lesquels C = 1,70; K = 3,60 et K′ = 1,96, si T = 15° et T′ = 7°, les formules (12) deviennent

$$t = \frac{116,11 + 163,46E}{12,72 + 10,89E} \quad \text{et} \quad M = \frac{148,08}{12,72 + 10,89E},$$

et on a respectivement pour

E =	0m.10	0m.20	0m.30	0m.40	0m.50	0m.60	0m.70	0m.80	0m.90	1m.00
t =	9°.60	9°.90	10°.34	10°.63	10°.88	11°.22	11°.33	11°.51	11°.68	11°.83
M =	10.7	9.9	9.2	8.6	8.1	7 6	7.2	6.9	6.6	6.3

La formule (10) donne respectivement

M =	33.42	26.86	22.92	19.24	16.84	15.03	13.48	12.25	11.30	10.39

6° *Transmission de la chaleur à travers les vitres.* 1° Si une seule face de la pièce est exposée à l'air, de manière qu'on puisse supposer la température t des faces intérieures égale à celle T de l'air intérieur (5°), on a, en admettant que le réchauffement et le refroidissement s'effectuent de la même manière pour les mêmes excès de température,

$$(t-\theta)(k+k') = (\theta - T')(k+k');$$

d'où

$$\theta = \frac{t+T'}{2} \quad \text{et} \quad M = \frac{t-T'}{2}(k+k'). \qquad (13)$$

θ température de la vitre.

2° Pour une enceinte entièrement vitrée chauffée par de l'air chaud et exposée de toute part à l'air extérieur, les faces intérieures n'étant chauffées que par le contact de l'air, puisque ayant toutes la même température leur rayonnement réciproque ne change pas cette température, on a

$$k'(T-\theta) = (\theta - T')(k+k'), \quad \text{d'où} \quad \theta = \frac{k'T+(k+k')T'}{2k'+k}.$$

et

$$M = k'(T-\theta) = (k+k')\frac{k'(T-T')}{2k'+k}. \qquad (14)$$

A cause du rayonnement du sol, et des pertes de chaleur à travers les joints des vitres, pertes qui peuvent varier dans des limites très-étendues, M. Péclet pense que pour les serres et les constructions analogues, il y a lieu d'admettre les chiffres de transmission de la formule (15).

3° Pour un bâtiment en maçonnerie isolé de toutes parts, et dont les vitres n'occupent qu'une petite partie de la surface, comme pour les églises, la chaleur que les vitres reçoivent par rayonnement est $(t-\theta)(k_1-k)$, et celle qu'elles reçoivent par le contact de l'air est $k'(T-\theta)$. On a alors

$$(t-\theta)(k_1-k)+k'(T-\theta) = (\theta-T')(k'+k), \text{ d'où } \theta = \frac{T'(k+k')+t(k_1-k)+Tk'}{2k'+k}.$$

et

$$M = (\theta - T')(k+k') = \frac{(k_1-k)(t-T')+k'(T-T')}{2k'+k}(k+k'). \qquad (15)$$

K_1 coefficient du pouvoir rayonnant des murs (tableau de la page 406).
K *id.* des vitres *id.*
K' coefficient de la perte de chaleur due au contact des vitres avec l'air (2° page 406).

Pour $T = 15°$; $T' = 7°$; $K = 2.91$; $K_1 = 3.60$; des murailles de 10 à 20 mètres de hauteur sur $0^m.50$ d'épaisseur, et d'une conductibilité $C = 1.70$, la valeur de t sera à peu près de 10°, et suivant que la hauteur des fenêtres est de :

	1	2	3	4	5 mètres.
K' =	2.400	2.210	2.130	2.082	2.049
M =	14.64	13.79	13.24	13.21	13.06

La formule (13) donne respectivement :

M =	21.20	20.48	20.16	19.97	19.83

7° *La quantité de chaleur perdue par le sol* est en général très-petite, comme l'expérience le prouve, et elle peut être négligée dans l'établissement des appareils de chauffage. Dans nos climats la température du sol étant à peu près constante à 8 mètres de profondeur, et égale à la température moyenne annuelle de 10 à 11°, il en résulte que la température du sol des édifices doit être bien voisine de cette dernière, qui diffère peu de celle intérieure habituelle de 15°.

8° Quant à l'*influence de la partie supérieure des pièces*, les édifices publics et les maisons particulières étant toujours recouverts d'une toiture et d'un plancher épais de grenier, il en résulte qu'on peut négliger la perte de chaleur par la partie supérieure des édifices.

9° *Transmission de la chaleur à travers les enveloppes cylindriques.*

Ce cas est celui, par exemple, d'un tuyau métallique parcouru par de la vapeur et enveloppé d'une matière conduisant mal la chaleur. On a

$$M = \frac{2\pi R'C(k+k')(T-T')}{C+(k+k')R'N}.$$

M quantité de chaleur transmise par unités de longueur de tuyau et par heure ;
$N = e(\log R' - \log R)$;
$e = 2.3025$ base des logarithmes népériens ;
R et R' rayons extérieurs du tuyau et de l'enveloppe ;
T et T' températures intérieure et extérieure ;
C coefficient de conductibilité de l'enveloppe [4°] ;
k et k' coefficients dus au rayonnement et au contact de l'air (1° et 2°) ; si la matière enveloppante est couverte de toile, $k = 3.65$, et k' se déduit de la formule donnée et au 2° pour les cylindres horizontaux.

324. *Chauffage des appartements par les cheminées ordinaires.* La quantité de chaleur rayonnée dans l'appartement par un foyer ordinaire de cheminée est à peu près le 1/4 de la chaleur totale rayonnée par le combustible ; ainsi, pour le bois, elle est seulement les 0,06 ou 0,07 de la chaleur totale développée par sa combustion (275).

Les combustibles les plus convenables pour ce mode de chauffage sont la houille et le coke, dont les pouvoirs rayonnants sont très-

grands (282 et 283). La cheminée ouverte n'utilise cependant qu'environ les 0,13 de la chaleur totale développée par ces combustibles.

On peut admettre que dans les cheminées ordinaires 1 kilog. de bois exige au moins l'appel de 100 mètres cubes d'air, et 60 mètres dans celles qui sont le mieux construites (284).

Le diamètre d'une cheminée ordinaire d'appartement varie de 0m,20 à 0m,25. Rarement il convient de dépasser cette limite, à moins que pour les appartements destinés à recevoir un grand nombre de personnes; dans ce cas, afin de faciliter la ventilation, on porte ordinairement la section des cheminées à 25 ou 27 décimètres carrés, 0m,80 sur 0m,32 environ.

Dans les cheminées à la Rumfort, l'ouverture inférieure du tuyau à fumée varie de 0m,04 à 0m,06 de section. Dans les cheminées à la L'Homond, la distance du tablier au contre-cœur est de 0m,15, et à une hauteur de 0m,30, le contre-cœur porte des briques qui ne laissent plus à l'ouverture que 0m,05 de largeur.

D'après des expériences faites par les membres du comité consultatif, les proportions de charbon nécessaires pour maintenir une même salle à la même température pendant le même temps, sont 100 pour les cheminées ordinaires, 13 pour les poêles métalliques, et de 13 à 16 pour les appareils analogues aux poêles, mais à foyers ouverts.

Dans le choix des différents modes de chauffage, il faut avoir égard, selon les circonstances, non-seulement à la chaleur utilisée, mais aussi à la ventilation produite.

325. *Chauffage par des poêles* (323). Lorsqu'un tuyau dans lequel circule de la fumée chauffe directement l'air extérieur, on peut admettre que la quantité de chaleur qui passe à travers ses parois est proportionnelle à la différence des températures intérieure et extérieure, et, des expériences de M. Péclet sur les cheminées en tôle, en fonte et en terre, il résulte que un mètre carré de surface laisse passer en une heure, pour une différence de température de un degré, 3,93 unités de chaleur pour la tôle, 9,9 unités pour la fonte, et 3,85 unités pour la terre cuite de 0m,01 d'épaisseur.

D'après cela, supposant que dans un poêle la fumée soit abandonnée à 200°, on peut même, avec de bonnes dispositions, l'amener jusqu'à 100° avant de la laisser s'échapper au dehors, sa température aux environs du foyer étant au moins de 800°, sa température moyenne est de 500° pendant la chauffe et l'excès de température varie de 400° à 500°; d'où il résulte que, dans ce cas, chaque mètre carré de surface de chauffage laisse passer en une heure, pour un excès moyen de 450°, 1768,5 unités de chaleur pour la tôle, 4455 pour la fonte, et 1732,5 pour la terre cuite de 0m,01 d'épaisseur.

Cette énorme différence des quantités de chaleur qui passent à tra-

vers la tôle et la fonte n'existe pas dans le chauffage par l'eau ou par la vapeur.

Les résultats précédents peuvent servir à calculer la surface de chauffe d'un poêle ou d'un calorifère, les tuyaux parcourus par la fumée ayant la section minimum de la cheminée (288), et le combustible produisant un effet utile égal aux 0.80 de sa puissance calorifique. Dans la pratique, on compte ordinairement sur un mètre carré de surface de chauffe en tôle ou en fonte, quoique pour cette dernière elle puisse être beaucoup moindre, par 100 mètres cubes de capacité de salle à chauffer.

Le diamètre des tuyaux de poêle peut se calculer comme celui des cheminées; mais il vaut mieux généralement s'en tenir aux dimensions 0m,10 à 0m,20 adoptées en pratique.

On donne un degré suffisant d'humidité à l'air, en plaçant un vase plein d'eau sur le poêle ou dans les conduits d'air chaud. La quantité d'eau est de 1 à 1,5 litre environ par jour pour une salle de 75 à 80 mètres cubes.

326. *Calorifères à air chaud.* L'air à échauffer doit toujours être pris à l'extérieur, et pour les calorifères placés dans les pièces qu'ils doivent chauffer et ventiler, tels que ceux que l'on emploie depuis quelque temps dans les écoles, il faut compter sur un mètre carré de surface de chauffe par kilogramme de houille ou par 2 kilogrammes de bois brûlés à l'heure, sans compter l'enveloppe extérieure.

Pour les calorifères non placés dans les pièces qu'ils doivent chauffer et ventiler, la quantité maximum de combustible à brûler se détermine en supposant que son effet utile est les 0,50 ou 0,55 de sa puissance calorifique (275); cet effet utile atteint les 0,75 et même les 0,80 pour les calorifères les mieux construits. La grille, pour une même quantité de combustible brûlée, a la même surface que pour les chaudières à vapeur (294), mais il vaut mieux augmenter cette surface que de la diminuer. La section de la cheminée et des canaux de circulation se calcule comme pour les chaudières à vapeur (288), en supposant égale à 200° la température de la fumée dans la cheminée. La surface de chauffe réelle est de 2 mètres carrés par kilog. de houille ou 2 kilog. de bois à brûler par heure.

La quantité d'eau à donner par jour pour entretenir l'humidité est de 1.5 à 2 litres pour une salle de 100 mètres cubes.

Les tuyaux qui conduisent l'air chaud dans les diverses pièces à chauffer doivent, autant que possible, partir tous du réservoir même d'air chaud, afin qu'ils ne se gênent pas mutuellement. Deux tuyaux branchés l'un sur l'autre ne doivent pas se servir d'obturateur; aussi faut-il, dans ce cas, faire usage d'une culotte. Les dimensions des tuyaux doivent être grandes; la vitesse de l'air ne doit pas être supérieure à 0m,50 en moyenne, les coudes et les étranglements des clefs compensés.

Les bouches doivent être larges et maillées avec du fil de fer très-fin,

à grandes mailles de $0^m,005$ au moins de côté. Les bouches à coulisses sont plus commodes pour régler l'ouverture que celles à charnières.

Sans un moyen d'évacuation de l'air de la salle, l'air chaud ne peut pas s'y introduire. L'appel peut se faire par la cheminée, quand il y en a une, ou par une cage d'escalier contigu, à l'aide d'une bouche grillagée de communication. Dans les salles à manger ou les antichambres, on peut placer au plafond ou près du plafond une bouche grillagée qui communique, par un tuyau de $0^m,15$ à $0^m,16$ de diamètre, avec un tuyau de tôle montant de 2 mètres dans la cheminée de la cuisine ou dans tout autre cheminée constamment chauffée.

Quand on chauffe plusieurs étages avec un seul calorifère, les étages supérieurs absorbent tout l'air sans rien laisser au rez-de-chaussée; on remédie à cet inconvénient à l'aide de coulisses ou en divisant par des cloisons le réservoir d'air chaud en autant de parties qu'il y a d'étages. Il convient, quand cela est possible, que le tuyau qui conduit l'air à chaque étage circule sous le plafond de l'étage inférieur; des bouches convenablement distribuées sur sa longueur amènent l'air dans la pièce en traversant le plancher. Cette disposition nous a parfaitement réussi dans une fabrique de papiers peints, où l'on avait à la fois à chauffer et sécher.

Pour pouvoir chauffer un rez-de-chaussée, le calorifère doit être établi dans une cave en contre-bas; sans cela l'air chaud se distribue mal dans la pièce, il n'y va même pas si l'on chauffe en même temps des étages supérieurs.

Lorsqu'on fait arriver l'air chaud dans une pièce telle qu'un amphithéâtre par un grand nombre d'orifices placés sous les bancs, la section de ces orifices doit être calculée de manière que la vitesse de l'air ne dépasse pas $0^m,20$ par seconde.

Il n'y a guère que dans les hôpitaux où il soit nécessaire de maintenir une température constante jour et nuit. On y parvient par une combustion continue dans les foyers, ou par des réservoirs d'eau qui accumulent de la chaleur développée le jour pour la dégager lentement la nuit. Mais, à moins que les murailles n'aient qu'une bien faible épaisseur, la chaleur qu'elles renferment est presque toujours suffisante pour rendre peu sensible la diminution de température pendant la nuit.

En général, quand les murailles sont d'une certaine épaisseur, les chauffages de nuit sont inutiles, et presque toujours un chauffage actif d'un petit nombre d'heures le matin peut réparer en grande partie la perte du régime qui a eu lieu pendant la nuit.

Quand les murailles n'ont qu'une faible épaisseur, comme dans certaines usines, elles se refroidissent beaucoup pendant la nuit; mais on parvient encore facilement à les échauffer en allumant les foyers un certain nombre d'heures avant l'arrivée des ouvriers.

Lorsque les pièces ne sont employées que certains jours et à certaines

heures, pour économiser le combustible, on ne maintient pas les murailles dans un état constant de température, on ne rétablit même pas l'équilibre au moment de les utiliser; on se contente, par un chauffage très-vif de quelques heures, d'échauffer partiellement les murailles, et de compenser leur faible température par un plus grand échauffement de l'air pendant l'occupation des pièces (325).

Les différentes parties des appareils de chauffage se construisent pour les jours les plus froids de l'hiver, et de manière que le matin, en un petit nombre d'heures, ils puissent amener l'air et les murs de la salle à la température qu'ils doivent avoir pendant le jour. Il est économique de disposer les appareils de manière que, pendant ce chauffage préliminaire, on puisse interrompre la ventilation; ainsi, le calorifère étant à air chaud, il convient de pouvoir faire aller successivement l'air de la salle au calorifère et du calorifère à la salle.

327. *Chauffage de l'air par la vapeur.* D'après des expériences de Tredgold, les quantités de vapeur condensées en une heure par mètre carré de surface d'un tuyau exposé à l'air libre à 15° sont, pour les tuyaux

de fer blanc.	1k.07
de verre.	1 .76
de tôle neuve.	1 .80
de tôle rouillée.. . . .	2 .10

D'après Clément, la température de l'air étant 25°, un mètre carré de surface condense en une heure les poids de vapeur consignés dans le tableau suivant. La dernière colonne donne, d'après la loi du n° 297, les poids de vapeur qui seraient condensés si la température de l'air était de 15°.

DÉSIGNATION DES SURFACES.	CONDENSATION, la température de l'air étant de	
	25°	15°
	k.	k.
Tuyau horizontal en fonte nue.	1.60	1.81
Id. *id.* noircie.	1.50	1.70
Id. en cuivre nu..	1.30	1.47
Id. *id.* noirci.	1 50	1.70
Tuyau vertical en cuivre noirci.	1.75	1.98

Dans les grands chauffages à vapeur, on peut compter sur 1k,80 de vapeur condensée en une heure par mètre carré de surface pour la fonte, et sur 1k,75 pour le cuivre.

D'après M. Grouvelle, un mètre carré de surface de fonte, chauffé intérieurement par la vapeur, et par conséquent les 990 unités de cha-

leur transmises par 1k,80 de vapeur condensée, suffisent pour chauffer et entretenir à 15° une salle de proportions de murs et de fenêtres ordinaires, telle que bibliothèque, bureau, etc., de 66 à 70 mètres cubes de capacité, ou un atelier de 90 à 100 mètres cubes. Si l'atelier a besoin d'une haute température, on prend un mètre de surface de chauffe par 70 mètres de capacité. Pour la Bourse de Paris, on a compté sur 67 mètres, qui chauffent convenablement.

Le diamètre des tuyaux de condensation de la vapeur à basse pression varie de 0m,07 à 0m,20; 0m,11 est le diamètre convenable lorsque le générateur est de la force de 12 chevaux. Le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière est beaucoup plus petit; en Angleterre on fait ce tuyau en fer creux, et on lui donne de 3 à 5 centim. de diamètre; en France on le fait généralement en cuivre.

Lorsque, par suite de circonstances indépendantes du chauffage, la pression dans le générateur est élevée, de 2 atmosphères et au-dessus, d'après M. Grouvelle, le diamètre intérieur du tuyau de condensation doit être égal à un minimum de 0m,035, augmenté de 0m,0015 par force de cheval du générateur employé. Ainsi, pour une force de 10 chevaux, c'est-à-dire pour 200 à 250 kilog. environ de vapeur à l'heure, le diamètre sera 0m,05.

Connaissant le volume en mètres cubes d'air froid à chauffer dans un certain temps, en le multipliant par le poids d'un mètre cube (43 et 256), on a le poids total d'air à chauffer; ce poids, multiplié par la capacité calorifique de l'air (261) et par la différence des températures de l'air chaud et de l'air froid, donne la quantité de chaleur à fournir à l'air. Cette quantité de chaleur divisée par 550, chaleur latente de vaporisation (265), donne la quantité de vapeur condensée. On détermine la quantité de charbon à brûler (275), et par suite les dimensions de la grille (294), des conduits de fumée et de la cheminée (288).

Pour le chauffage des ateliers par la vapeur, les ingénieurs admettent que, pour des ateliers de 8 mètres de largeur sur 3 mètres de hauteur et dont la surface des vitres est le 1/6 de la surface totale, un tuyau en fonte de 0m,40 de circonférence, parcourant seulement une fois la longueur de l'atelier, suffit pour y maintenir une température constante de 15° pendant les temps les plus froids. Cela fait une surface de chauffe de 0m.c.,40, qui peut transmettre 396 unités de chaleur en une heure, par mètre courant d'atelier.

D'après des observations de M. Péclet sur plusieurs chauffages à vapeur, et notamment sur un chauffage de grande fabrique, pour une différence maximum de 20° entre les températures intérieure et extérieure, il faudrait calculer la puissance des appareils de chauffage en comptant sur 70 unités de chaleur à fournir en une heure par mètre carré de surface de muraille de 0m,33 à 0m,35 d'épaisseur, et sur 80 unités par mètre carré de surface de vitre (323).

328. *Calorifères à eau chaude et à basse pression.* Nous allons calculer les dimensions d'un tel calorifère destiné à émettre 36000 unités de chaleur en une heure ou 10 unités par seconde; la température de l'eau étant de 80° dans la chaudière et dans la colonne ascensionnelle, qui a 2 mètres de hauteur verticale; de 55° en moyenne dans le tuyau de chauffe, que l'on suppose avoir une pente totale de 2 mètres, uniforme sur tout son circuit, et enfin de 30° en rentrant dans la chaudière.

Chaque kilog. d'eau perdant 50 unités de chaleur dans sa circulation, le poids d'eau qui doit sortir de la chaudière en une seconde est $\frac{10}{50}=0^k,2$, dont le volume moyen dans le tuyau est, en prenant 0,000466 pour coefficient de la dilatation absolue de l'eau pour 1° (254),

$$0,2(1+0,000466\times 55)=0,205\text{ l de litre.}$$

En admettant que la quantité de chaleur que laisse passer la surface de chauffe, à égalité de différences de températures, est à peu près la même que pour la vapeur (327), chaque mètre carré de surface de fonte laisse passer en une heure, pour la différence 40° entre la température 55° de l'eau et celle 15° de l'air, $1,80\times 550\frac{40}{85}=466$ unités de chaleur. La surface de chauffe nécessaire pour laisser passer les 36000 unités de chaleur est donc

$$\frac{36000}{466}=77,25\text{ mètres carrés.}$$

Le diamètre d'un tuyau de chauffe étant $0^m,09$, sa circonférence est $0^m,2826$, et par suite sa longueur sera $\frac{77,25}{0,2826}=275$ mètres. Prenant 3 mètres pour les parties qui sont en dehors de la pièce à échauffer, et qui comprennent la colonne ascendante et les raccordements du tuyau de chauffe avec cette colonne et la chaudière, on a 278 mètres pour le développement total de la circulation.

La vitesse de circulation de l'eau dans les tuyaux est due à la différence des pressions produites par deux colonnes d'eau de 2 mètres de hauteur verticale, l'une à 55° en moyenne et l'autre à 80°, cette différence étant exprimée par une hauteur d'eau à 55°. Or la première, c'est-à-dire la colonne descendante, presse, par décimètre carré de section, de $\frac{1}{1+0,000466\times 55}20=19^k,50$, et la colonne ascendante, de $\frac{1}{1+0,000466\times 80}20=19^k,28$; par conséquent la vitesse de circulation est due à une hauteur d'eau à 55° correspondant à $0^k,22$. En eau froide, cette colonne serait $0^m,022$; en eau à 55°, elle est

$$0,022\,(1+0,000\,466\times 53)=0^m,0225\,6\,;$$

ce qui fait $0^m,000\,081\,15$ par mètre courant de tuyau.

Consultant le tableau du n° 163, on voit que sous la charge $0^m,000\,077\,21$, le diamètre $0^m,09$ débite $0^l,3181$ par seconde; ce diamètre est donc grandement suffisant pour l'application qui nous occupe. Il n'est cependant pas aussi exagéré qu'il paraît l'être; d'abord à cause des changements de direction des tuyaux, et ensuite parce que la résistance étant proportionnelle au carré de la vitesse, le tableau du n° 163 donne, dans ce cas, une résistance ou charge trop faible, en la donnant pour la vitesse moyenne dans la conduite.

Pour chauffer un atelier de 13 mètres de largeur sur $3^m,25$ de hauteur, une seule allée d'un tuyau de $0^m,16$ de diamètre sur toute la longueur de l'atelier paraît suffisante, la température de l'eau étant de 75 à 80° (327). En général, dans la pratique, l'eau étant à 80° et l'air à 15°, c'est-à-dire la différence étant de 65°, il convient de considérer $1^{m.c.},50$ à $1^{m.c.},75$ de surface de chauffe comme l'équivalent de $1^{m.c},00$ à la vapeur, et de chauffer 35 à 40 mètres cubes de salle ou de maison d'habitation par mètre carré de fonte.

On suivrait une marche analogue pour chauffer une pièce quelconque à l'aide de l'eau de condensation d'une machine à vapeur; seulement, dans ce cas, on élèverait l'eau mécaniquement.

329. *Calorifères à eau chaude et à haute pression.* On distingue le système mis en pratique par M. Duvoir, et le système Perkins. Dans le premier la pression est portée jusqu'à 5 atmosphères, et dans le second elle atteint une limite beaucoup plus élevée.

Un procédé de M. Duvoir consiste à chauffer l'air extérieur en le faisant passer sur des tuyaux dans lesquels circule l'eau chaude; cette disposition, d'un heureux effet, est employée depuis longtemps en Angleterre. Une autre disposition de M. Duvoir, et qui forme la base de tous ses appareils, consiste dans un système de *poêles à eau* placés dans les salles mêmes, et chauffés en les faisant traverser par une seule circulation d'eau dont ils font partie intégrante; l'eau passe d'un poêle à l'autre par l'intermédiaire d'un tuyau.

Le système Perkins est formé d'une seule circulation d'eau par un tuyau d'un petit diamètre; ce qui le rend peut-être moins dangereux que celui de M. Duvoir, quoique la pression y soit beaucoup plus élevée.

Les tuyaux employés à la fabrication de ce dernier genre de calorifères sont en fer creux, et ont $0^m,025$ de diamètre extérieur et $0^m,012$ de diamètre intérieur. Ces tuyaux sont composés de bouts qui ont 4 mètres de longueur et vissés entre eux. On les essaya à 200 atmosphères de pression; mais, théoriquement, ils peuvent supporter une pression supérieure à 3000 atmosphères (173 ou 303).

Dans les calorifères construits en Angleterre, la température de l'eau

à la partie supérieure du circuit varie de 150° à 200°, ce qui correspond à des pressions de 4,50 à 15 atmosphères (266); mais dans le foyer les tubes atteignant la température rouge, la pression est beaucoup plus grande; ainsi au rouge naissant, qui correspond à 525°, la pression est 1076 atmospbères (232).

Le développement total d'une circulation n'excède jamais 150 à 200 mètres; si la surface de chauffe exige une plus grande longueur, on emploie plusieurs circulations qui peuvent être chauffées par le même foyer.

En Angleterre, on compte sur 2 pieds de longueur de tuyau pour chauffer 100 pieds cubes de capacité; ce qui revient à peu près, en prenant la moyenne entre 0m,025 et 0m,012 pour le diamètre de la surface de chauffe, à 1 mètre carré de surface de chauffe pour 80 mètres de capacité.

L'expérience prouve qu'il y a perte d'eau dans ces calorifères, et que, dans les grands appareils, il faut ajouter 1/2 litre d'eau tous les 8 ou 10 jours.

En France, M. Gandillot établit ces calorifères à 9 fr. le mètre courant de tube, tout compris.

330. *Chauffage des liquides.* Lorsqu'on chauffe directement un liquide dans une chaudière à l'aide d'un foyer placé dessous, la surface de chauffe peut encore se calculer d'après la considération qu'un mètre carré de cette surface laisse passer la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser de 15 à 20 kilog. d'eau en une heure (299); mais il convient de prendre un mètre carré de surface de chauffe pour 3 à 4 kilog. de houille ou 6 à 8 kilog. de bois à brûler par heure. Les différentes parties du fourneau se déterminent comme pour les chaudières à vapeur ordinaires (288 et 294).

Chauffage des bains. Supposons qu'il s'agisse de déterminer la quantité de charbon nécessaire pour chauffer l'eau dépensée pour 25 bains, l'eau froide étant à 5°.

Une baignoire contenant de 280 à 300 kilog. d'eau à 30°, la quantité de chaleur dépensée est, pour chauffer l'eau des 25 bains, $300 \times 25\,(30 - 5) = 187\,500$ unités, qui absorberont à peu près 31 kilog. de houille; on peut utiliser 6000 unités de chaleur par kilogramme de houille.

On ne chauffe qu'une partie de l'eau, et on l'élève à la température de 70° à 80°; le poids d'eau à échauffer de 5° à 80° est alors, pour les 25 bains, $\frac{187\,500}{75} = 2\,500$ kilog.

331. *Chauffage des corps solides.* Dans les fours destinés à fondre la fonte, la quantité de chaleur utilisée, c'est-à-dire absorbée par le métal pour s'échauffer et se fondre, n'est que les 0,09 de la chaleur totale développée par le combustible. (0,5 kilog. de coke pour fondre 1 kilog.

de fonte, lequel projeté dans 20 kilog. d'eau en élève la température de 14°. *Traité de la chaleur*, par M. Péclet.) M. Grouvelle évalue cette quantité de chaleur utilisée à 0,20 dans les fours de fusion de la fonte; à 0,05 dans les fours à puddler, ainsi que dans les fours à réchauffer les fers et les tôles, et à 0,02 dans les fours de verreries et dans ceux à cuire les poteries, les porcelaines, etc.

D'après des expériences de M. Ebelmen, la quantité de chaleur qu'emportent les gaz est les 0,62 de la puissance calorifique du combustible pour le haut fourneau de Clairval, marchant au charbon de bois, et les 0,67 pour celui d'Audincourt, marchant avec un mélange de bois et de charbon de bois. Cette perte est plus considérable pour les hauts fourneaux au coke; ainsi on brûle de 140 à 220 kilog. de coke pour 100 kilog. de fonte dans ces derniers, au lieu de 100 à 160 kilog. de charbon que l'on brûle dans les premiers.

Dans les fours continus destinés à la fabrication de la chaux, on emploie 1 volume de houille ou 1 volume 1/2 de coke pour 4 volumes de pierre à chaux. Les petits fours donnent 12 hectolitres de chaux par jour et les plus grands de 90 à 100 hectolitres.

Lorsqu'on cuit le plâtre au moyen des gaz perdus dans la fabrication du coke (283), il conviendrait de faire arriver sur le gaz un courant d'air qui en opérerait la combustion, et au delà de la flamme, un second courant d'air qui amènerait les gaz résultant de la combustion à 200 ou 300°, attendu que la cuisson du plâtre s'opère à 100°. (Consulter la 5ᵉ partie.)

VENTILATION.

332. *Air nécessaire à la respiration.* D'après les expériences de M. Dumas, un homme, par sa respiration, transforme en acide carbonique, par heure, tout l'oxygène contenu dans 90 litres d'air, et le volume d'air qu'il expire est de 333 litres, qui contiennent à peu près 0,04 d'acide carbonique.

333. *Air vicié par la transpiration.* Il résulte des expériences de Séguin et de M. Dumas, qu'un homme, par sa transpiration cutanée et pulmonaire, produit en une heure 37,5 grammes de vapeur d'eau, qui peuvent être dissous par $5^{mc},846$ d'air à 15° et déjà moitié saturé (269). La quantité d'air que vicie un homme en une heure, par sa respiration et sa transpiration, est donc moyennement de $6^{mc},179$. M. Péclet, en introduisant 6 mètres cubes d'air par élève, dans une école située rue Neuve-Coquenard, et contenant ordinairement 200 élèves, a remarqué que l'air intérieur n'avait jamais d'odeur. Les expériences de M. Leblanc, dans une salle contenant 180 élèves, confirment les résultats de M. Péclet. Une ventilation de 6 à 7 mètres cubes d'air en une heure,

par individu, suffisait pour la salle des séances de la Chambre des députés, qui contenait de 1000 à 1100 personnes.

Dans les appareils de chauffage et de ventilation d'édifices publics examinés aux nos 336 et suivants, on s'est basé sur des nombres plus grands que ceux qui précèdent.

334. *Air vicié par l'éclairage.* Dans la combustion des matières employées à l'éclairage, on peut admettre que l'air qui alimente la combustion n'est brûlé qu'au 1/3.

***TABLEAU** des poids de quelques matières brûlés en une heure, des volumes d'air nécessaires à la combustion, et des quantités relatives de lumière produites.*

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	POIDS brûlé.	VOLUME D'AIR brûlé au tiers.	LUMIÈRES relatives.
	gr.	m. c.	
Chandelles de six à la livre.	11	0.322	11
Bougie.	11	0.322	14
Lampes gros bec	42	1.266	100

Ce tableau permet de calculer la quantité d'air vicié par l'éclairage artificiel d'une pièce, et comme, d'après les nos 332 et 333, on a les quantités d'air viciées par la respiration et par la transpiration des personnes, il est donc facile de déterminer la quantité d'air à introduire dans une pièce contenant un nombre déterminé de personnes, et dont l'éclairage artificiel consomme un poids donné de bougie ou d'huile.

L'air vicié par la respiration et la transpiration est encore propre à l'alimentation du foyer de chauffage, qui, dans les appartements chauffés par le rayonnement du combustible, suffit généralement à l'appel de tout l'air nécessaire à la ventilation.

335. *Chaleur produite par la respiration.* D'après M. Dumas, la quantité de carbone brûlée en une heure par l'acte de la respiration d'un homme est de 10 grammes; la chaleur développée est donc de 71,7 unités (275, expériences de Dulong). Une partie de cette chaleur est employée à former les 37,5 grammes de vapeur fournis par la transpiration (333), le reste $71,7 - 0,0375 \times 650 = 47,3$ unités est employé à chauffer l'air environnant, et il joue un grand rôle dans le chauffage des lieux habités. En effet, pour porter de 0° à 20° les 6 mètres cubes d'air consommés en une heure par la respiration et la transpiration d'un homme (332 et 333), il suffit de $\frac{6 \times 1.3 \times 20}{4} = 39$ unités de chaleur (1k,3, poids du mètre cube d'air à 0° sous la pression 0m,76 (43;

4, rapport approché de la capacité calorifique de l'eau à celle de l'air (261)), c'est-à-dire moins que l'excès 47,5 unités provenant de la respiration. De là, il résulte que s'il n'y avait pas de refroidissement par les parois d'une pièce habitée dont l'air aurait été préalablement porté à 20°, cette température resterait constante en y introduisant $\frac{6 \times 47,5}{39} = 7,28$ mètres cubes d'air à 0°, par personne et par heure.

La température du corps humain est de 37°; celle des oiseaux, de 43° à 44°; celle des mammifères, de 37° à 40°, et celle des poissons, de 14° à 25°.

EXEMPLES D'ÉDIFICES PUBLICS CHAUFFÉS ET VENTILÉS.

336. *Chauffage et ventilation de la prison cellulaire Mazas et de celle de Provins.* Les nombres de ce numéro et des suivants, sur le chauffage et la ventilation, sont extraits du *supplément à la seconde édition du Traité de la chaleur* de M. Péclet.

1° La commission chargée d'examiner les projets de chauffage et de ventilation de la prison cellulaire Mazas a adopté le projet de M. Grouvelle, basé sur le principe de la circulation de l'eau chaude, avec le secours de la vapeur comme moyen de transmission de la chaleur aux réservoirs alimentant la circulation de l'eau dans les tuyaux de chauffage, mais en apportant au projet les modifications suivantes:

1° Porter à 10 mètres cubes par heure le volume d'air à fournir à chaque cellule de 20 mètres cubes de capacité;
2° Élever à 15° la température constante des cellules;
3° Établir une double circulation d'eau chaude, et en sens contraire, dans le canal de chauffage, afin qu'en chaque point du circuit la température moyenne des tuyaux fût sensiblement constante;
4° Établir la ventilation des cellules par les tuyaux de descente des matières fécales.

La ventilation des 1200 cellules, divisées en 6 bâtiments d'un rez-de-chaussée et de 2 étages, est produite par une cheminée d'appel en briques, de 2m,15 de diamètre intérieur et de 29 mètres de hauteur, placée au centre des six bâtiments à cellules. La cheminée des trois générateurs est en tôle et placée au centre de la cheminée d'appel; son diamètre est de 0m,80.

La commission chargée de la réception des travaux de M. Grouvelle a nommé une sous-commission composée de MM. Péclet, Leblanc et Thauvin pour les expérimenter. Voici l'extrait des résultats obtenus:

1° Les expériences ont eu lieu du 15 février 1850 au 30 avril 1851, et ont fourni des résultats aussi réguliers que possible pour le chauffage des différents étages;
2° L'appel par la cheminée s'est élevé à 30 000 mètres cubes par heure; ce qui

correspond à un renouvellement d'air de 25 mètres cubes par cellule, au lieu de 10 mètres cubes, limite inférieure exigée par le cahier des charges;

3° La température a été maintenue pendant l'hiver entre 13° et 16° dans tous les bâtiments occupés, corridors et cellules;

4° Pour un chauffage continu de 12 jours et 12 nuits, la température extérieure étant de 7°,5, et la vapeur venant se condenser dans les serpentins placés dans les réservoirs d'eau chaude étant maintenue entre 2 et 3 atmosphères, la température des cellules s'est élevée jusqu'à 19°,50 et 20°,72 au rez-de-chaussée, et jusqu'à 20°,94 et 23°,31 au premier étage. Les différences entre les températures d'un même étage proviennent de l'orientation des cellules;

5° Pendant l'hiver de 1849-50, dans des expériences faites dans les caves de ventilation, pour une consommation de 13k,50 de houille par heure dans le foyer d'appel, on a expulsé 14 800 mètres cubes d'air par heure, et pour une consommation de 22k,33 de houille dans le même temps, la ventilation s'est élevée à 24 700 et 30 900 mètres cubes. Pendant les plus grandes chaleurs de l'été 1850, pour 20 kilog. de houille la ventilation a varié de 22 900 à 25 000 mètres cubes;

6° Pendant l'hiver de 1850-51, dans des expériences de ventilation générale : 1° L'air expulsé s'est élevé à 29 200 mètres cubes pour 20 kilog. de houille brûlés par heure dans le foyer d'appel; 2° La fumée étant bien refroidie sous des plaques de fonte avant d'arriver à la cheminée des générateurs, cette cheminée a peu d'influence sur la ventilation générale; ainsi, après une interruption de chauffage de vingt-quatre heures, la ventilation de 29 200 n'a descendu qu'à 28 200; 3° La consommation du foyer d'appel ayant été réduite de 20 kil. à 15 kilog. par heure, la quantité d'air expulsée a été trouvée comprise entre 28 100 et 31 500 mètres cubes; cette faible diminution est due au peu d'influence de l'activité du foyer sur le tirage de la cheminée au delà d'une certaine limite.

7° Pendant l'hiver de 1850-51, pour les bâtiments dans lesquels les prises d'air étaient ouvertes sur le corridor, la consommation de houille pour le chauffage a été de 400 kilog. par bâtiment et par jour, pour obtenir une température moyenne intérieure de 15°,15, avec une température extérieure de 3°,89, c'est-à-dire pour un excès de 11°,25. Pour les bâtiments dont les prises d'air étaient extérieures, la consommation a été de 500 kilog. de houille pour obtenir une température moyenne intérieure moins élevée de près de 1 degré. Le chauffage de l'administration a exigé 150 kilog. de combustible par jour pour les mêmes circonstances atmosphériques.

Pendant les sept mois de chauffage, la température moyenne à Paris étant 6°,5, admettant 14° pour la température moyenne intérieure, c'est-à-dire un excès de 7°,5, la consommation moyenne par bâtiment sera de 270 kilog. de houille, et 100 kilog. pour l'administration. Ainsi la dépense totale sera de $270 \times 6 + 100 = 1720$ kilog. par jour.

Quant à la ventilation, la dépense moyenne de combustible est de 350 kilog. par jour d'hiver, et de 400 kilog. par jour le reste de l'année; mais pour obtenir une ventilation de 30000 mètres cubes par heure, la consommation de combustible est de 20 kilog. par heure en hiver et 25 kilog. en été.

Les murs ont 0m,60 d'épaisseur, et leur surface totale exposée au contact de l'air est à peu près de 15 000 mètres carrés, non compris les surfaces des voûtes et du sol, qui transmettent peu de chaleur. La surface totale des vitres est de 2175 mètres carrés.

Admettant que M = 15, pour la quantité de chaleur transmise par mètre carré de muraille et par heure (5° du n° 323), et M=22 pour la transmission des vitres dans les mêmes circonstances; la perte totale de chaleur par les vitres et les murailles sera 15 × 15000 + 22 × 2173 = 242 806 unités.

Pour élever 30000 mètres cubes d'air de 7°,5 à 14°, température à laquelle il sort des cellules, il faut 1,3 × 6,5 × 0,25 × 30000 = 63 375 unités de chaleur.

La chaleur produite par les 1200 détenus est 40 × 1200 = 48 000 unités.

La chaleur que doit fournir le calorifère est alors 242 806 + 63 375 — 48 000 = 258 181. Chaque kilogramme de houille produisant un effet utile de 3 750 unités, on brûlera par heure 68k,85 de houille, et par jour 68,85 × 24 = 1 652k,4, au lieu de 1 620 kil. que donne l'expérience.

2° La prison cellulaire de Provins a la même disposition que la prison Mazas, mais elle ne contient qu'un bâtiment et 59 cellules seulement. Les appareils de chauffage ont aussi été établis par M. Grouvelle, et d'après la disposition de la prison Mazas, si ce n'est que la chaudière chauffe directement l'eau chaude de circulation, et c'est la chaleur de la fumée de la chaudière qui produit la ventilation en hiver; en été, un foyer spécial d'appel produit la ventilation.

La cheminée du calorifère a 0m,31 de diamètre, et elle s'élève de 5 mètres dans la cheminée d'appel, qui a 18 mètres de hauteur, 1m,06 de diamètre à la base et 0m,60 au sommet.

Les murailles ont 0m,60 d'épaisseur moyenne et 1059 mètres carrés de surface. La surface des vitres est de 107m,50.

Dans des expériences faites du 15 mars au 6 avril par M. Gentilhomme, la température moyenne pendant le jour étant de 6° et les nuits très-froides, la température moyenne de la journée a été de 14°,95 dans les cellules, de 15°,16 dans la galerie donnant entrée aux cellules, et de 18° dans le greffe. La température moyenne a été de 1° plus élevée dans les cellules exposées au midi que dans celles exposées au nord.

Le chauffage était toujours suspendu pendant la nuit, et cependant l'abaissement de température n'a jamais dépassé 0°,31; ce qui doit être attribué à la grande quantité de chaleur contenue dans les murailles et dans l'eau chaude.

Des expériences de ventilation opérées sur les tuyaux de descente de quelques cellules ont fourni les volumes d'air expulsés de chaque cellule, par heure, consignés dans le tableau suivant:

FOYER DE LA CHAUDIÈRE en plein feu, et le foyer d'appel éteint.		FOYER DE LA CHAUDIÈRE éteint depuis 12 heures, et le foyer d'appel éteint.		FOYER DE LA CHAUDIÈRE éteint, et le foyer d'appel allumé.		
	m.		m.			m.
Rez-de-chaussée.	»	Rez-de-chaussée.	32.4	Rez-de-chaussée.	Côté du nord.	64.8
1er étage.	59.4	1er étage.	28.8		*id.* midi.	43.4
2e étage.	81.0	2e étage.	16.0	1er étage.	*id.* nord.	97.2
					id. midi.	72.7
Moyenne.	70	Moyenne.	25.7	2e étage.	*id.* nord.	95.7
					id. midi.	80.0
				Moyenne.		75.6

Pendant que les expériences précédentes sur les tuyaux de descente s'exécutaient, on a aussi opéré directement sur la cheminée d'appel, et on a trouvé que les volumes totaux d'air écoulés en une heure par cette cheminée étaient respectivement dans la première, la deuxième et la troisième condition du tableau précédent, 3400, 1051 et 2940 mètres cubes; ce qui fait par cellule 87, 27 et 75,4 mètres cubes.

Le chauffage a lieu avec de la tourbe, dont la consommation moyenne journalière est de 367 kilog., équivalant à environ 175 kilog. de houille. La consommation moyenne du foyer d'appel n'a pas été observée.

337. L'appareil de chauffage de l'église Saint-Roch a aussi été établi par M. Grouvelle. Il consiste en une circulation d'eau chaude à basse pression placée dans des caniveaux situés sous le sol; l'air extérieur est appelé dans ces caniveaux, d'où il sort échauffé pour se répandre dans l'église.

Dans un caveau circulaire, qui règne sous le pourtour de la chapelle de la Vierge, est placée une chaudière ordinaire à deux bouilleurs, d'une puissance de 12 chevaux environ. Un tuyau de fonte, de 0m,14 de diamètre, dont les bouts sont réunis par des joints à boulons, et d'un développement de 168 mètres, part du sommet de la chaudière et passe sous le bas côté droit de l'église, en s'élevant par une pente d'environ 0m,03 par mètre; son point culminant est sous l'orgue; il revient par le côté gauche de l'église en suivant la même pente, et finit par aboutir à l'un des bouilleurs de la chaudière. Un petit tuyau additionnel, placé après coup, circule en sens contraire du tuyau principal, parallèlement au tuyau de retour, et finit par déboucher dans ce tuyau à son point culminant, c'est-à-dire sous l'orgue.

Les tuyaux circulent dans un canal dont chaque paroi verticale est formée de deux murailles en briques légèrement espacées, afin de diminuer le refroidissement. Le fond est formé de planches, dans lesquelles sont pratiquées les ouvertures d'admission de l'air froid; c'est dans le plafond du canal que sont pratiquées les prises d'air chaud, qui vien-

nent déboucher dans le sol de l'église. Après chaque bouche de chaleur se trouve une cloison transversale en bois qui ferme complétement le canal, et immédiatement après se trouve une arrivée d'air froid, qui, par cette disposition, est échauffé par toute la longueur de tuyau comprise entre deux bouches de chaleur.

Un système analogue au précédent, mais dont le tuyau n'a que 0m,12 de diamètre et 86 mètres de longueur, part de l'autre extrémité de la chaudière et circule sous la chapelle de la Vierge et le calvaire.

Des valves placées sous les tuyaux de départ et d'arrivée permettent de modifier ou même de supprimer la circulation dans chacune des grandes artères. Sur le pourtour de l'artère principale, 4 renflements de 3 mètres de longueur et de 0m,35 de diamètre augmentent encore la surface de chauffe; 4 autres renflements, en forme de poêles de différents diamètres, sont placés à l'orifice des bouches principales, et des petits embranchements sans retour favorisent encore le tirage des bouches qui ne sont pas directement placées sur le parcours.

Le tuyau de fumée a 0m,35 de diamètre; il est en tôle, et sur une longueur de 7 mètres il chauffe l'air qui alimente une bouche isolée de la chapelle de la Vierge.

Surface de chauffe, y compris les bouilleurs. . . .	15m,40
Surface de la grille.	0m,40
Surface de refroidissement de la circulation. . .	164m,85
Volume de l'eau qui s'échauffe.	3m,008
Id. qui se refroidit.	4m.218
Température de l'eau dans la chaudière.	120°
Id. à sa rentrée dans la chaudière.	102°
Température moyenne de l'eau en circulation. .	111°.
Différence maximum de niveau.	3 à 4m
Nombre de bouches grillées versant l'air dans l'église.	22
Surface libre de chacune de 21 de ces bouches. .	0m,135
Id. de la bouche placée sous l'orgue.	0m,400
Id. de toutes les bouches	3m,235
Longueur de l'église.	110 à 115m
Largeur.	28m
Hauteur moyenne.	15 à 18m
Superficie, environ.	3150m
Volume, environ.	32000m
Surface des murailles exposées au refroidissement.	5835m
Épaisseur moyenne de ces murailles.	0m.50
Surface des vitraux.	860m
Volume des murs et piliers intérieurs.	1800m
Nombre des places assises.	3500
Nombre des personnes réunies les dimanches ordinaires.	2000 à 4000
Nombre des personnes réunies les fêtes ordinaires.	4000 à 6000
Id. grandes fêtes. .	6000 à 8000
Surface totale des ouvertures pratiquées dans la voûte et des fissures des fenêtres.	14m.15

Hauteur moyenne à laquelle se trouvent toutes ces ouvertures et fissures.	11m,20
Nombre des portes donnant à l'extérieur.	6

Des expériences de M. Pottier ont fait voir que le maximum de puissance de l'appareil était limité à maintenir la température intérieure à 16° au-dessus de la température extérieure; ce qui est suffisant dans les plus grands froids.

Après un chauffage continu de 10 jours, on a amené la température intérieure à 16°, et même à 18° pendant les offices du dimanche, la température extérieure étant de 4 à 5°. Une fois toute la masse de l'église échauffée, on a pu alors ne chauffer que quelques heures par jour, ou mieux, on a pu attendre que la température intérieure se fût abaissée de 2 à 3°, et alors chauffer le temps suffisant pour la ramener à son point de départ; cette dernière marche paraît être plus économique sous le point de vue du combustible. Des expériences, il résulte que la température extérieure étant 5° et celle intérieure 12°, il faudrait interrompre le chauffage pendant 5 à 6 jours pour obtenir un abaissement de 1° seulement.

Des thermomètres placés à 8 ou 9 mètres du sol, sous l'orgue, et d'autres à 18 ou 20 mètres, à la corniche du dôme de la chapelle de la Vierge, n'ont, pendant 20 jours, indiqué une température supérieure à la moyenne de 10 thermomètres placés à 2 mètres du sol que de 0°,25 à 0°,75 au maximum.

Contre toutes les surfaces intérieures des murailles, et jusqu'à une assez grande distance, la température de l'air est constamment inférieure de 0°,75 à 1°,50 à celle de l'air dans la partie centrale.

Du 17 novembre au 18 janvier, c'est-à-dire en 63 jours, comprenant les 10 jours de feu continu, on a brûlé 32 170 kilog. de houille, ce qui fait une moyenne de 510 kilog. par jour. Pendant ce temps, la température moyenne intérieure a été de 13 ou 14°, et celle extérieure 5 ou 6°.

La perte de chaleur par les murailles, pour l'excès de température de 16°, qui correspond au maximum d'effet de l'appareil, et en prenant le coefficient de conductibilité C = 1,27, est M = 14,80 par mètre carré et par heure (5° du n° 323), et pour la totalité des murs par heure 14,80 × 5835 = 86 358 unités.

La hauteur des fenêtres étant de 4 mètres, pour un excès de température de 16°, M = 40 unités (formule (13) du n° 325); la perte totale de chaleur par les vitraux est alors de 40 × 860 = 34 400 unités par heure.

La perte totale de chaleur par les murailles et les vitres est donc de 86 358 + 34 400 = 120 758 unités.

Admettant que les 40 kilog. de houille brûlés par heure produisent un effet utile de 3850 × 40 = 154 000 unités de chaleur, la perte de chaleur par la ventilation est donc de 154 000 — 120 758 = 33 242.

338. Le grand amphithéâtre du conservatoire des arts et métiers est chauffé et ventilé d'après un dispositif de M. Léon Duvoir-Leblanc. Aux termes du marché, la température ne doit pas être inférieure à 15°, et elle s'élève habituellement à 20° pour les grandes réunions de 800 personnes.

Pour obtenir la même température au bas et au sommet de l'amphithéâtre, et extraire, sans gêner les auditeurs, une quantité d'air suffisante pour enlever toute émanation, M. Duvoir a ouvert, vers le bas des gradins, sous les jambes des auditeurs, des orifices d'appel qui sont en communication avec des conduits pratiqués sous les gradins. Ces orifices sont au nombre de 39, dont 34 ont 0m,08 sur 0m,20 et sont répartis sur les 2/3 de la hauteur de l'amphithéâtre, et dont les 5 autres sont situés sous le premier gradin et ont 0m,15 sur 0m,60 d'ouverture. Tous les conduits se réunissent dans une pièce située sous l'amphithéâtre et qui contient le calorifère à eau chaude. Dans cette pièce, et à 0m,50 au-dessus du sol, s'ouvrent 4 bouches d'appel prolongées par autant de conduits verticaux qui se réunissent en un seul tuyau horizontal communiquant à une grande cheminée d'appel, au bas de laquelle se trouve un foyer qu'on n'allume qu'en cas de besoin.

Des tuyaux de circulation d'eau chaude, avec des parties renflées, appelées bouteilles, passent dans le fond du conduit horizontal pour en échauffer l'air et produire l'aspiration.

La cheminée verticale contient deux tuyaux en fonte, l'un qui communique au fourneau d'une machine à vapeur, et l'autre toujours chaud qui sert de commencement de cheminée au calorifère.

Ces deux tuyaux sont raccordés avec deux autres plus petits qui forment la cheminée du petit calorifère auxiliaire employé pour déterminer ou accélérer au besoin l'appel d'air.

Il a encore été établi dans le plafond de l'amphithéâtre, au-dessus de la partie la plus élevée des gradins, une large bouche d'appel qui communique directement à la cheminée d'appel par un tuyau horizontal.

La somme des sections des 4 orifices qui font appel dans la chambre du foyer, augmentée de la section 0m.c.,49 de l'orifice pratiqué dans le plafond de l'amphithéâtre est de 1m.c.,655.

La section de la cheminée prise à hauteur du regard est 1m,10 × 1m,03 = 1m.c.,133. Si l'on en déduit la section 0m.c.,187 des tuyaux en fonte, il reste pour le passage libre 0m.c.,946.

Des expériences faites par M. Morin, et qui ont duré 9 jours, pendant lesquels les températures moyennes intérieure et extérieure ont été environ de 19° et de 6°, on a constaté :

1° Que par suite de l'effet de la circulation de l'air et de l'appel plus considérable par le bas que par le haut, la différence des températures de la partie supérieure et du bas n'a jamais dépassé 1°.5 sur 20°, qui était la température maximum ;

2° Que pour les ventilations actives, le volume d'air enlevé a été en moyenne de 15m.23 par chacune des 800 personnes et par heure, et pour les moins actives 10m.0. A ce dernier chiffre, aucune odeur désagréable ne se faisait sentir, mais cependant on doit prendre celui de 15 à 16m pour base des projets de ventilation des salles occupées par des personnes en bonne santé; pour des malades et surtout des blessés il est loin d'être suffisant.

Par des expériences spéciales faites à l'hospice Beaujon, M. Morin a constaté que la quantité d'air évacué variait de 40 à 60 mètres cubes par malade et par heure, et qu'elle était à peine suffisante quand il n'y avait pas de blessures trop graves. Si l'air était bien distribué dans les salles, il est évident que ces quantités d'air seraient plus que suffisantes (340);

3° Que le foyer d'appel n'a généralement été entretenu que faiblement; l'échauffement de la cheminée par le simple tuyau de chauffage et celui des conduits horizontaux par les bouteilles pleines d'eau chaude ont paru suffisants;

4° Que la quantité totale de charbon brûlée par jour pour le chauffage et la ventilation a varié de 180 à 225 kilog. par jour, soit 200 kilog. par jour.

339. *Chauffage et ventilation de la salle des séances de l'Institut.* Note lue par M. Cheronnet à la séance de l'Institut du 6 mai 1852, et publiée dans la *Revue de l'instruction publique.*

« La salle des séances de l'Institut est chauffée et ventilée d'après les procédés de M. Duvoir-Leblanc. Le chauffage est produit par 4 poêles remplis d'eau chaude, à travers lesquels circule un courant d'air qui s'échauffe. Ces appareils, situés aux 4 coins de la salle, pourront fonctionner ensemble ou séparément, suivant la température de l'air extérieur, au moyen de robinets de communication spéciale entre chacun d'eux et le générateur.

» La ventilation se fait par deux grands conduits qui communiquent, l'un avec une série de grilles situées devant les pieds même des membres de l'Institut, l'autre avec un grand nombre de trous faits dans les gradins qui règnent sur les longs côtés de la salle. Le premier de ces tuyaux descend jusqu'au rez-de-chaussée, pour remonter ensuite dans une cheminée, dans laquelle est un réservoir à eau chaude de 12 mètres de hauteur qui produit l'appel. Le second tuyau ne descend que jusqu'à l'entresol, et remonte ensuite dans la cheminée. Un troisième conduit, destiné à la ventilation d'été, part de la partie supérieure de la salle et se rend dans la cheminée.

» Le 5 avril, une expérience a été faite dans le but de constater la quantité d'air extraite de la salle des séances : cette expérience a été exécutée au moyen de deux anémomètres qui ont été placés simultanément dans les deux conduits, et y sont restés une heure chacun. Voici les résultats de cette expérience :

» 1er orifice (rez-de-chaussée), section 0m,970, vitesse de l'air 0m,938 par seconde, volume écoulé en une heure 3275m,496. 2e orifice, section 0m,3842, vitesse 1m,284, volume écoulé en une heure 1795m,916. Ainsi pendant cette première expérience il a été extrait de la salle des séances 5071 mètres cubes d'air. La salle renfermait 180 personnes, ce qui donne,

par heure et par personne, $23^{m},20$. Le temps était très-beau, et la température était de 12 à 13°.

» Le 19 avril, une seconde expérience a été faite dans les mêmes conditions; elle a donné, pour le premier conduit, $4022^{m},784$; pour le second, $1908^{m},372$; total, 5931. Il y avait 200 personnes dans la salle; le volume d'air extrait a donc été de $29^{m},65$ par heure et par personne. Ce jour-là le temps était très-couvert; il est même tombé de la neige pendant l'expérience; la température extérieure s'est élevée à 7°,5 environ. »

540. *Chauffage et assainissement de l'hopital Lariboissière.* Quoique les appareils de chauffage et de ventilation de ce grand établissement ne soient pas encore terminés, il y a lieu de donner quelques détails sur les projets adoptés.

L'hôpital se compose d'une cour carrée de 115 mètres environ de longueur sur 45 mètres de largeur, environnée de portiques. Perpendiculairement aux longs côtés, à égales distances les uns des autres et aux extrémités, se trouvent six pavillons isolés, à deux étages. A chaque étage de chacun de ces bâtiments et au rez-de-chaussée se trouve une salle renfermant 32 lits, et une plus petite qui n'en contient que 2; ainsi le nombre des lits de chaque bâtiment est de 102, et le nombre total 612. Dans la direction des petits côtés de la cour intérieure, se trouvent des bâtiments qui se prolongent jusqu'à la distance des extrémités des pavillons; enfin, derrière un des petits côtés de la cour intérieure, et dans l'alignement des grands côtés, se trouvent encore d'autres constructions; ces bâtiments sont destinés aux différents services de l'établissement. Tous sont environnés par un mur d'enceinte.

Un projet de M. Duvoir-Leblanc a été adopté pour une moitié de l'établissement, et un autre de MM. Thomas, Laurens et Grouvelle pour l'autre moitié.

Le projet de M. Duvoir consiste à placer dans la cave de chaque pavillon un calorifère à eau chaude, dont l'eau alimente un certain nombre de poêles placés dans les salles. L'air pris au niveau du sol s'échauffe en passant autour des tuyaux de communication de l'eau chaude et à travers les poêles, entre dans les salles, et s'échappe ensuite par des conduits verticaux qui le conduisent dans le grenier; là, il est dirigé par des canaux horizontaux, renfermant des tuyaux à eau chaude, dans une cheminée ayant 5 mètres de hauteur.

Le projet de MM. Thomas, Laurens et Grouvelle consiste en une chaudière à vapeur placée dans une cave située sous une des cour de service, qui était destinée à la chaudière à vapeur des bains; une haute cheminée en briques, placée à côté, opère le tirage du foyer. La vapeur, formée sous une pression de 4 à 5 atmosphères et détendue dans une machine de manière à conserver une pression de une atmosphère et demie, est conduite en face de chaque pavillon par un tuyau en fonte

placé au centre d'un caniveau creusé dans les galeries souterraines qui font le tour de la cour intérieure de l'hôpital ; ce tuyau est enveloppé de corps mauvais conducteurs qui réduisent à fort peu de chose la chaleur perdue. Il passe dans son trajet à côté des bains, et fournit, par un court branchement, la vapeur qu'ils exigent. Un petit tuyau branché sur la conduite générale, en face de chaque pavillon, y conduit la vapeur nécessaire au chauffage ; les corridors et les chambres des sœurs sont chauffés par des bouches de chaleur qui reçoivent l'air chauffé par les colonnes montantes de vapeur et de retour d'eau. La cage de l'escalier, le chauffoir et les salles de malades renferment des poêles à eau chauffés par la vapeur. Les tuyaux de conduite de vapeur dans les salles sont placés dans un caniveau situé au-dessous du parquet et recouverts d'une plaque de fonte. Les étuves des offices sont entretenues chaudes par la circulation d'un petit filet de vapeur dans le bain-marie dont elles se composent. L'eau pour les bains est chauffée dans un réservoir en tôle placé au grenier, à l'aide d'un serpentin dans lequel circule la vapeur.

La machine à vapeur, dans laquelle se détend la vapeur qui est ensuite employée au chauffage, fait mouvoir un ventilateur qui aspire de l'air recueilli au sommet du clocher de la chapelle, et le refoule dans des tuyaux en tôle qui le portent à chacun des pavillons et à chacun des chauffoirs. Dans l'épaisseur du mur de tête de chaque pavillon existe une cheminée qui reçoit l'air insufflé et permet de le distribuer aux divers étages. Sous le plancher de chaque salle, et contre le caniveau qui contient les tuyaux à vapeur et de retour d'eau, se trouve une galerie en maçonnerie partant de la cheminée ; l'air forcé circule dans cette galerie, d'où, par un certain nombre d'orifices ménagés à sa paroi, il se répand autour des tuyaux à vapeur et y prend une température de 20 à 30° ; alors il entre dans la salle par des ouvertures pratiquées dans la plaque de fonte qui recouvre le caniveau. Les sections de ces ouvertures sont telles, que l'air qui en sort ne possède qu'une faible vitesse.

Des cheminées aboutissant au grenier, au nombre de 9, et creusées dans chaque mur latéral des salles, sont destinées à évacuer l'air vicié ; chacune d'elles porte à cet effet deux orifices d'entrée munies de registres ; l'un, placé au niveau du sol, sert pour l'hiver ; l'autre, à 2m,50, ne s'ouvre que l'été. Les cheminées d'évacuation débouchent dans les greniers, et l'air vicié qu'elles amènent se dégage par 4 châssis à tabatière, et par une cheminée centrale en tôle placée au centre du grenier. Cette disposition ne permet pas d'utiliser les greniers ; mais si on voulait s'en servir, il faudrait conduire l'air des cheminées partielles à la cheminée centrale par des canaux.

L'état hygrométrique de l'air dans les salles est maintenu à 1/2 par une injection de vapeur dans les tuyaux de conduite.



La quantité d'air insufflé peut varier de 20 à 40 mètres cubes par lit et par heure.

L'air sort du ventilateur avec un excès de pression de 0m,04 d'eau.

Il y a une machine à vapeur, une chaudière et un ventilateur de rechange.

La vapeur sortant de la chaudière, ou de la machine où elle a été détendue, suffit à tous les services : chauffage, ventilation, bains, buanderie, élévation d'eau.

341. *Chauffage et ventilation des ateliers de taillerie et de cristallerie de Baccarat*, par MM. Thomas et Laurens. Extrait d'une note de ces ingénieurs rapportée par M. Péclet.

Dans ce magnifique établissement, les ateliers consacrés à la taille des cristaux se composent d'un corps de bâtiment de 150 mètres de longueur, qui, à une de ses extrémités, se prolonge par une aile en retour d'équerre ayant même hauteur et même largeur que lui, et une longueur de 45 mètres; toutes les dispositions ont donc dû être prises comme s'il se fût agi d'un seul corps de bâtiment de 200 mètres de longueur. Le rez-de-chaussée et le premier étage sont occupés par deux files de tours à tailler les cristaux, mis en mouvement par deux turbines d'une force collective de 60 chevaux. Ces ateliers contiennent constamment 544 ouvriers.

Le taillage se faisant à l'eau, l'atmosphère est constamment saturée; ce qui exige une ventilation active et un chauffage plus dispendieux.

Les travaux de ventilation et de chauffage ont été établis en même temps et combinés ensemble. Le chauffage s'effectue à l'aide de la vapeur à haute pression, 4 atmosphères et 5 au besoin pendant les plus grands froids, et la ventilation à l'aide de deux ventilateurs à force centrifuge. Un des ventilateurs, mis en mouvement par la turbine n° 1, est placé dans le grenier, et il refoule dans les salles de travail de l'air pur puisé à la hauteur des toits; une conduite générale de vent, en planches de sapin bien jointives, est établie sur le plancher du grenier, et des tuyaux, aussi en bois, descendent de distance en distance pour porter l'air neuf aux diverses salles. En hiver, cet air est préalablement échauffé à la température d'environ 30°, par son passage dans une chambre que traverse un faisceau de 15 tuyaux de vapeur ayant 0m,135 de diamètre et 2 mètres de longueur.

Les orifices d'arrivée de l'air neuf sont placés dans l'axe des salles, à 10 mètres environ les uns des autres, et à 1 mètre au-dessus du plancher.

Les salles n'ayant que 8m,50 de largeur, l'air se trouve suffisamment bien réparti.

L'air vicié s'échappe des salles sans aucune cheminée d'appel, simplement par les joints des fenêtres que l'on a soin de ménager à cet effet. On ne ressent aucun courant incommode.

Le second ventilateur est appliqué à la turbine n° 2, et il fait le service de l'autre moitié des ateliers.

Les ventilateurs ont 1m,20 de diamètre et une largeur de 0m,28; ils font 300 tours par minute; la pression du vent dans les répartiteurs qui aboutissent aux ventouses n'est que de 3 à 4 millimètres d'*alcool*.

Le volume de vent insufflé s'élève à environ 12 mètres cubes par ouvrier et par heure, ce qui est suffisant à cause de la bonne répartition de l'air dans l'atelier.

Le chauffage est produit par de simples tuyaux de vapeur en fonte qui circulent sous les établis des ouvriers; ils enlèvent ainsi l'humidité plus spécialement accumulée dans ces établis, et permettent aux ouvriers d'avoir les pieds chauds.

L'expérience a prouvé qu'avec la ventilation indiquée, il est indispensable, soit d'émettre de la chaleur dans les ateliers, soit, de préférence, d'élever la température de l'air insufflé, à des époques de l'année et à des heures de la journée pour lesquelles la température extérieure semblerait devoir rendre tout chauffage inutile. On explique ce fait, qui est une cause d'excès de dépense, par l'efficacité de la ventilation, jointe à l'humidité répandue dans les ateliers. Si l'air neuf n'arrive pas dans les salles à une température d'au moins 22 à 25°, il occasionne une sensation désagréable, ou plutôt les salles se refroidissent rapidement: d'où résulte la nécessité de chauffer l'air de ventilation la majeure partie de l'année, si ce n'est toute la journée, au moins le matin.

ÉCLAIRAGE.

342. *Propriétés physiques de la lumière*. La radiation de la lumière est rectiligne, et la vitesse de ses rayons est de 70000 lieues par seconde. Pour une même source, l'intensité de la lumière diminue dans le rapport inverse des surfaces des sections du cône de lumière, c'est-à-dire en raison inverse du carré de la distance.

343. *Matières employées à l'éclairage*. Il en est qui sont solides, d'autres qui sont liquides, et d'autres gazeuses.

Les matières solides appliquées à l'éclairage sont: 1° les branches de bois résineux, employées dans quelques contrées peu civilisées; 2° les chandelles, qui se fabriquent avec le suif provenant du bœuf, du bouc, du mouton; 3° les bougies proprement dites, qui se font avec la cire d'abeilles, et celles fabriquées avec le blanc de baleine et les acides margarique et stéarique.

TABLEAU de la quantité de chandelle et de différentes bougies consommées par heure en grammes, et de la clarté relative, celle de la bougie de cire de 8 au kilogramme étant représentée par 100.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES BRULÉES.	CONSOMPTION par heure, en grammes.	CLARTÉ relative.
	g.	
Chandelles de suif, de 6 au 1/2 kilog. . . .	9.53	81
Bougies stéariques, 4 *id.*	10.63	98
Id. 5 *id.*	10.16	92
Id. 6 *id.*	9.84	89
Id. 8 *id.*	9.22	82
Bougies de cire, 4 *id.*	9.37	100
Id. 6 *id.*	8.59	92
Id. 8 *id.*	7.66	83
Bougies de blanc de baleine, 4 *id.*	10.31	118
Id. 5 *id.*	9.22	100
Id. 6 *id.*	8.53	96

En divisant les nombres de la troisième colonne par ceux de la deuxième, on a les quantités relatives de lumière produites par le même poids des diverses matières; on trouve ainsi que le pouvoir éclairant de la cire étant 100, les pouvoirs moyens du suif, de l'acide stéarique et du blanc de baleine sont respectivement 80, 84 et 104.

Les huiles, grasses, siccatives et essentielles, sont les liquides employés à l'éclairage. Les huiles grasses sont les seules que la pratique ait généralement adoptées; les huiles siccatives ne peuvent être employées à cause de leur durcissement à l'air, et les huiles volatiles ne brûlent qu'avec fumée et dégagent une odeur fort désagréable. Parmi les huiles grasses, les plus généralement employées sont celles d'olive, de colza, de navette et d'œillette au pavot.

Le gaz utilisé pour l'éclairage s'extrait de la houille, des résines, des acides gras de toute nature, et de presque toutes les matières organiques, puisqu'elles donnent par la distillation des carbures d'hydrogène gazeux, principe essentiel du gaz de l'éclairage.

344. *Éclairage par le gaz.* La flamme du gaz de l'éclairage est d'autant plus brillante que la densité du gaz est plus grande, que l'hydrogène contient plus de carbone, que le nombre des particules de carbone est plus grand, et que la température de l'air d'alimentation et par suite celle de la flamme sont plus élevées. Le pouvoir éclairant du gaz de la houille est moindre que celui du gaz de l'huile; dans une série d'expériences, la densité du gaz de la houille était 0,529 en moyenne, et celle du gaz à l'huile 0,960, le pouvoir éclairant du premier étant 100, celui du second a été 272.

L'éclairage d'un bec de lampe Carcel consommant 42 grammes d'huile

épurée à l'heure se paye, pour un éclairage journalier de 5 heures, 134f,47 par an, y compris l'entretien et le nettoyage de la lampe, qui coûtent, par abonnement, 18 fr. par an, et les mèches, dont la consommation est de 1 fr. 50 c. par an. Pour le même temps d'éclairage journalier par le gaz à l'huile, on paye 108 fr. par an pour un bec, et par le gaz à la houille, 93f,60. La lumière dans ce dernier cas étant à celle de la lampe Carcel dans le rapport de 1,40 à 1, la lumière annuelle d'une lampe Carcel, produite avec du gaz à la houille, ne coûterait donc que 66f,85.

Le gaz provenant de la distillation de l'huile a pour densité 1,054 au moment de sa préparation, et suivant qu'on le consomme à cet instant, ou deux ou quatre jours après, il faut brûler par heure 506 ou 544 ou 607 centimètres cubes pour obtenir la lumière d'une chandelle de 6 au 1/2 kilog. Pour le gaz de la houille, ces nombres sont respectivement 1012, 1087 et 1164 centimètres cubes.

On donne ordinairement aux becs la forme des becs d'Argaut. Le tuyau, à l'extrémité, s'évase et prend la forme d'un anneau dans lequel on soude une couronne métallique percée de trous circulaires dont le diamètre varie de 1/4 à 1/2 millimètre, par lesquels le gaz s'échappe. Le verre de ces becs a environ 0m,06 de diamètre sur 0m,15 à 0m,18 de hauteur. Le nombre de trous reconnu le plus avantageux est 20, ces trous sont espacés de 3 millimètres.

Les becs dits chauve-souris ou en éventails sont formés d'une sphère creuse en acier, de 6 millimètres de diamètre, réunie à un pas de vis par une petite gorge. Dans cette sphère on pratique à la scie une fente de 1/6 de millimètre environ de largeur, par laquelle s'échappe le gaz. Ils sont vissés dans un petit tube en cuivre soudé à la conduite.

Il y a dans l'enceinte de la capitale 6 compagnies gazières. Elles ont sous les rues de Paris 446 kilomètres de conduites en fonte, en tôle bituminée et en plomb. Les services publics leur prennent 13910 becs, consumant 14470 mètres de gaz par jour. Les services particuliers en consomment 42000 mètres cubes par jour.

Tarif de la vente du gaz aux particuliers à Paris.

1° Le mètre cube livré au compteur : 0f,42 pour 1854, 0f,41 pour 1855, et 0f,40 pour 1856 et les années suivantes;

2° Par heure d'un bec brûlant depuis la chute du jour jusqu'à 10 heures : 6c,10 pour 1854, 6c,05 pour 1855, et 6 centimes pour 1856 et les années suivantes;

3° Par heure d'un bec brûlant depuis la chute du jour jusqu'à 11 heures et minuit : 5c,60 pour 1854, 5c,55 pour 1855, et 5c,50 pour 1856 et les années suivantes.

Les becs auxquels s'appliquent ces prix doivent être percés de 20 trous d'un tiers de millimètre de diamètre; la hauteur de la flamme est de 8 centimètres, celle du verre-cheminée ne peut excéder 20 cent. Un tel bec consomme en moyenne 120 litres par heure.

Un modèle des becs avec galerie, cheminée et autres accessoires est déposé à la préfecture de police.

Le prix de tout autre bec que celui déterminé plus haut, ou d'un éclairage qui aurait lieu à des heures autres que celles ci-dessus, est débattu de gré à gré entre les compagnies et les abonnés. Il en est de même pour les becs cylindriques percés de 20 trous placés à l'extérieur.

Chaque compagnie est tenue, dans la circonscription et dans les localités où il existe des conduites, de fournir le gaz à toute personne qui a contracté un abonnement de trois mois au moins, et qui s'est d'ailleurs conformée aux dispositions des règlements concernant la pose des appareils.

Aucun abonnement ne peut être refusé; mais les compagnies sont en droit d'exiger que le payement s'en fasse par mois et d'avance. Le gaz est fourni soit au compteur, soit au bec et à l'heure, à la volonté des abonnés.

Les compteurs sont à la charge des abonnés, qui ont la faculté de les faire établir et entretenir par des abonnés de leur choix.

Les abonnés au compteur ont la libre disposition du gaz qui a passé par le compteur; ils peuvent distribuer le gaz comme bon leur semble, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de leur domicile.

Cornues. Les cornues servant à la distillation de la houille doivent être en très-bonne fonte grise, ni trop grise ni trop blanche, afin qu'elles ne soient ni trop perméables au gaz ni trop cassantes. En les coulant debout on obtient plus de régularité et d'homogénéité. Elles ont 0^m 035 d'épaisseur, et on leur donne aujourd'hui les plus grandes dimensions possibles: leur longueur varie de 7 à 8 pieds (2^m,274 à 2^m,60); leur largeur intérieure, de 1 pied 1/2 à 2 pieds (0^m,487 à 0^m,650), et leur hauteur, de 10 pouces à 15 pouces (0^m,271 à 0^m,406). Quelquefois on ne place qu'une cornue dans un four, d'autres fois 3, le plus souvent 5 et dans ces derniers temps on a atteint le chiffre 9. Si les cornues en terre réfractaire ne sont pas généralement employées, c'est qu'il faut une terre d'une excellente qualité, et des hommes habiles pour les exécuter. Plusieurs usines de Paris en font un usage exclusif et y trouvent de l'économie, due au moindre refroidissement au moment de la charge, et surtout à leur durée, qui dépasse quelquefois deux ans, au lieu que les cornues en fonte ne servent que neuf mois en moyenne; cependant les cornues en terre sont plus sujettes à des fêlures et à des ruptures instantanées que celles en fonte.

Houille (282). Pendant la distillation, le volume de la houille augmente quelquefois des 2/5 de son volume primitif; aussi a-t-on soin de charger un volume de houille qui n'est guère que la moitié de la capacité de la cornue. La tempérarure de la cornue pendant la distillation doit être constante et au degré du rouge cerise (252). La distillation d'une charge dure 4 heures 15 minutes pour le charbon de Mons et de Commentry; elle dure de 5 à 6 heures pour d'autres; ainsi celui des mines du Buisson (Belgique) ne peut être distillé en moins de 6 heures. Les ouvriers exercés déchargent et rechargent une cornue en 2 ou 3 min.



M. Gibon rapporte que des fours à 5 cornues, qu'il a établis à l'usine d'Arras, distillaient 7 hectolitres de houille grasse du poids de 80 kil. par chaque charge de 6 heures, et dépensaient pendant le même temps 2,50 hectolitres combles de coke, du poids de 45 kilog. l'hectolitre.

TABLEAU des dépenses de coke pour la distillation d'un hectolitre de houille de 80 kilogrammes, obtenues dans une usine de Paris.

	hect.	kilog.
Four à 1 cornue.	0.75	31.50
Four à 2 cornues, adossé.	0.55	23.10
Four à 5 cornues, non adossé.	0.54	22.75
Four à 5 cornues, adossé.	0.45	18.90

En général la distillation de 100 kil. de houille exige 25 à 30 kil. de coke.

Afin que les grilles ne soient pas détruites trop rapidement, par suite de la température très-élevée, on a imaginé de maintenir une nape d'eau dans le cendrier.

La houille qui convient le mieux pour les usines à gaz est celle qu'on désigne en Angleterre sous le nom de canel-coal; sa composition est de 74,47 de charbon, 5.42 d'hydrogène, 19.61 d'oxygène et 0,50 de cendres; elle donne 320 litres de gaz par kilog. En Angleterre, 1 hectolitre du poids de 80 kil. produit en moyenne 22 mètres cubes de gaz; en France, les charbons de Mons, très-propres à la distillation, en produisent 20 mètres cubes; le charbon de Commentry, employé depuis quelque temps à Paris, donne plus de gaz que celui de Mons, mais d'un pouvoir éclairant plus faible.

D'après une expérience de M. Penot, à Mulhouse, 1 kilog. de houille, suivant qu'il était sec ou contenait 10 pour 100 d'eau, a donné respectivement 240 litres de gaz de bonne qualité et 92 de mauvaise. et 160 litres de bonne qualité et 92 de mauvaise. La houille doit donc être sèche.

Condenseur. Le gaz, en sortant de la cornue, passe par un tube ascendant, appelé *buse montante*, d'un décimètre de diamètre, pour se rendre dans un cylindre horizontal de 0m,40 de diamètre, placé en avant et au-dessus du fourneau. Ce cylindre, appelé *barillet*, contient, jusqu'à un niveau déterminé, de l'eau dans laquelle la buse montante en se recourbant plonge de quelques centimètres.

En sortant du barillet, le gaz passe dans un tuyau en fonte plongé dans l'eau, où se condense la vapeur entraînée par le gaz. Le condenseur étant constamment rafraîchi par un filet d'eau froide, on calcule sa surface sur ce que 30 décimètres carrés suffisent pour condenser par minute la vapeur contenue dans 3 décimètres cubes de gaz; ainsi, un four monté de cinq cornues chargées chacune de 68 kilog., dont la production en cinq heures serait de 90 mètres cubes, ou 300 décimètres cubes

par minute, exigerait un condenseur de 30 mètres carrés de surface.

Épurateur. Du condenseur, le gaz passe dans l'épurateur, caisse, ordinairement en fonte, portant à sa partie supérieure et sur tout son contour extérieur une rigole contenant de l'eau dans laquelle plonge le bord du couvercle de la caisse, de manière à obtenir une fermeture hydraulique. Une cloison verticale, également en fonte, qui s'élève du fond jusqu'à une petite distance du couvercle, divise la caisse en deux parties égales. A des distances verticales égales on place dans chaque compartiment de la caisse trois claies en fer ou en osier, et quelquefois des plaques de tôle percées de trous. Ces claies sont soutenues par des tasseaux fixés aux parois de la caisse et de la cloison de division, et elles supportent chacune une couche de chaux éteinte pulvérulente, que le gaz est obligé de traverser et où il se débarrasse de l'hydrogène sulfuré qu'il contient. On fait arriver le gaz près du fond d'un des compartiments de la caisse, et il se dégage près du fond de l'autre, après avoir traversé six couches de chaux.

A Lille, Marseille, Arras, Bordeaux, etc., on a adopté un système méthodique qui consiste en quatre caisses semblables à celle qui vient d'être définie. Le gaz traverse toujours trois caisses pendant que l'on charge la quatrième, et on a soin de faire d'abord passer le gaz dans la première chargée, puis la deuxième et la troisième. Par ce moyen, on obtient facilement un gaz d'une pureté convenable pour la consommation, et avec 1 hectolitre de chaux vive on peut épurer 600 mètres cubes de gaz.

Laveur. Dans quelques usines, le gaz, en quittant le condenseur et avant de se rendre à l'épurateur, passe dans trois laveurs, généralement en fonte, où il laisse les sels ammoniacaux et l'ammoniaque qu'il renferme encore. Comme l'eau ne peut enlever la totalité de ces sels, M. Mallet a fait breveter un procédé qui consiste à substituer à l'eau pure l'emploi du chlorure de manganèse, qui est un résidu encombrant provenant de la fabrication du chlore et des chlorures décolorants. On a soin de diviser le gaz par bulles; il suffit que la pression soit de 2 à 3 centimètres pour opérer l'absorption; des agitateurs empêchent les dépôts de se former.

La dissolution s'extrait du premier laveur, dans lequel on fait passer le liquide du deuxième; celui-ci reçoit le liquide du troisième que l'on charge d'une dissolution pure : par là, l'épuration est méthodique. Ce procédé rend très-propre le gaz au traitement par la chaux : ainsi, un hectolitre de chaux suffit, en employant le système méthodique à quatre caisses, pour épurer 1400 à 1500 mètres cubes de gaz.

A défaut de chlorure de manganèse, on peut employer le sulfate de fer de basse qualité, qui ne coûte que 8 fr. les 100 kilog. à Paris, et même 5 à 6 fr. s'il n'est pas cristallisé. Ce ne serait que dans un cas exceptionnel qu'il faudrait songer à l'emploi de l'acide sulfurique étendu

pour priver le gaz de son ammoniaque. Les épurateurs devraient alors être en plomb.

Quand le procédé de M. Mallet n'est pas usité, ce qui a généralement lieu, le gaz sortant des épurateurs à chaux passe dans une caisse entourée d'une autre concentrique ayant même fond. Le gaz arrive dans la première caisse et passe dans la seconde en traversant des fentes horizontales faites dans les parois de la première. Comme on maintient de l'eau à un niveau supérieur à ces fentes, le gaz, pour passer dans la caisse extérieure, est obligé de traverser cette eau, où il laisse en grande partie son ammoniaque. Des petites hottes placées à la sortie des fentes divisent le gaz.

Depuis quelque temps, M. Mallet épure le gaz complétement en une seule opération, en plaçant sur les claies de l'épurateur un mélange humide de sulfate et d'oxyde de plomb, mélange qui se révivifie presque indéfiniment, après sa transformation sur les claies en sulfate d'ammoniaque et en sulfure de plomb. Enfin, à cause de la difficulté de se procurer du sulfate de plomb, MM. Laming et Mallet viennent de remplacer le mélange précédent par un autre composé de sciure de bois et d'oxyde de fer hydraté, qu'ils placent sur les claies au lieu de chaux, et qui absorbe l'hydrogène sulfuré après que le gaz a été privé de son ammoniaque dans le laveur.

Gazomètre. Quand le gaz est épuré, il se rend au gazomètre, dont la capacité dépend de la quantité de gaz qui doit se consommer dans un temps donné. Si, pour l'éclairage d'une ville, il faut 4000 mètres cubes de gaz en 10 heures, par exemple, et que les cornues soient chargées six fois en 24 heures, chaque charge devra produire 667 mètres cubes de gaz, et le gazomètre devra contenir quatre charges, soit 2661 mètres cubes. h étant la hauteur du gazomètre et d son diamètre, comme pour la solidité il convient de faire $d = 2h$, on aura donc, dans le cas qui nous occupe,

$$h = \sqrt[3]{\frac{2661}{\pi}} = 9^{m},50, \text{ et par suite } d = 19 \text{ mètres.}$$

Ordinairement la hauteur h s'augmente de $0^{m},30$ à $0^{m},60$. Les gazomètres des villes de province ont ordinairement de 15 à 20 mètres de diamètre; les plus grands de la capitale ont de 30 à 35 mètres.

Quelle que soit la dépense de gaz d'une usine, elle doit avoir au moins deux gazomètres, afin de pouvoir suffire à l'éclairage en cas d'accident ou de réparation.

Conduites. Pour que la distribution du gaz se fasse convenablement, il faut que sa pression soit au moins de 1 pouce d'eau ($0^{m},027$), et comme la pression dans les cornues doit être aussi petite que possible, il faut donc tâcher de placer l'usine au point le plus bas de la distribution.

Pour alimenter 2600 becs consommant chacun 5 pieds cubes

(0^{mc},10283) de gaz à l'heure, la pression étant de 18 lignes d'eau (0^{m},04), le diamètre du tuyau doit être de 6 pouces (0^{m},162); d'où il résulte que la vitesse du gaz y est de 3^{m},60 par seconde.

Dans une autre expérience, on a reconnu qu'un tuyau de 0^{m},108 de diamètre suffisait, sous la pression de 0^{m},027 d'eau, pour l'écoulement de 288 mètres cubes de gaz à l'heure.

Quoique les problèmes soient les mêmes que pour l'eau (164 et suivants), il est fort difficile de dresser des règles invariables pour fixer les diamètres des conduites de gaz. Dans des cas bien déterminés on peut appliquer les formules des n°s 208 et suivants, mais généralement on doit forcer les diamètres; c'est une garantie de succès qui n'a d'autre désavantage que d'augmenter le prix.

Il convient de placer les tuyaux de conduite à 1 mètre de profondeur en terre, afin qu'ils ne soient atteints ni par la gelée qui les brise, ni par les vibrations des voitures qui les ébranlent.

Tuyaux. Les tuyaux employés pour conduite de gaz sont en fonte comme pour l'eau (173 et suivants), et en plomb pour les diamètres de 8 à 40 millimètres.

Depuis quelques temps on emploie presque exclusivement à Paris, pour conduire le gaz, des tuyaux en tôle et bitume, imaginés par M. Chameroy. Leur diamètre varie de 0^{m},027 à 0^{m},40. La tôle varie de 1 à 2 millimètres d'épaisseur; cette dernière épaisseur a été reconnue suffisante pour les plus fortes conduites.

La tôle, bien décapée dans un bain acidulé, est étamée au plomb sur ses bords; puis courbée dans un laminoir à trois cylindres, dont elle sort avec la forme et la dimension du tuyau qu'on veut fabriquer. On écarte les lèvres du tuyau, et un emporte pièce fort ingénieux perce à la fois sur les deux bords les trous destinés aux rivets. Les trous ainsi obtenus se superposent parfaitement lorsque le tuyau vient à se refermer. Les rivets, en fer étamé, sont placés au marteau.

A l'une des extrémités du tuyau, on pratique une gorge évasée au moyen de deux cylindres en fonte portant des cannelures inverses l'une de l'autre et roulant l'une sur l'autre; puis on soude avec soin le tuyau.

Le tuyau ainsi préparé, on coule dans la gorge évasée de son extrémité, au moyen d'un moule intérieur en fonte soutenu par un bouchon de sable, un écrou en métal dur inoxydable, semblable pour sa composition à celui des caractères d'imprimerie; mais rendu un peu plus résistant par l'addition d'un peu de cuivre rosette. A l'autre extrémité du tuyau on coule de même, mais extérieurement, un pas de vis, de telle sorte que les tuyaux s'assemblent en se vissant l'un au bout de l'autre, mode d'assemblage supérieur à tous ceux employés jusqu'à ce jour. Le joint s'exécute rapidement au moment de la pose, et il est encore rendu plus intime au moyen d'un enduit composé d'huile et de minium.

Pour fondre les écrous des tuyaux de gros diamètre, M. Chameroy emploie un moule en fonte brisé en trois parties qui s'enlèvent avec la plus grande facilité après le refroidissement. Avant, le moule était d'une seule pièce, et il ne fallait pas moins de six hommes agissant à l'extrémité d'un levier de 3 mètres pour le dévisser. Jamais, sous cet effort, l'écrou ne s'est détaché du tuyau.

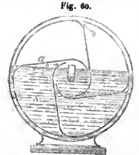
Dans cet état, le tuyau est rempli d'eau au moyen d'une presse hydraulique, et soumis à une pression de 15 atmosphères. S'il résiste, il est goudronné; puis on enroule autour une petite corde d'étoupe pour faciliter l'adhérence de la couche bitumineuse dont on va l'entourer. Ce bitume, préparé avec soin dans des proportions rigoureusement déterminées, se compose de bitume, de terre calcaire, de sable, et d'un peu de résine.

Un mandrin traverse le tuyau et sert à le manœuvrer sur une table, où l'on étend le bitume composé sortant de la chaudière. En faisant rouler le tuyau, le bitume s'attache autour, et telle est l'adresse des ouvriers employés à ce travail, que non-seulement tous les tuyaux ont identiquement le même diamètre, mais que leurs poids ne varient pas entre eux d'un demi-kilog.

Le tuyau reçoit alors intérieurement une couche de bitume plus fin renfermant moins de matières étrangères que celui qui le couvre extérieurement. Cette couche intérieure a tout le poli et le brillant du plus beau vernis.

Le prix de ces tuyaux est d'environ 40 pour 100 moins élevé que celui des tuyaux en fonte de même diamètre.

Fig. 60.



Compteur à gaz. La *fig.* 60 est la coupe perpendiculaire à l'axe d'un compteur, qui n'est autre chose qu'une espèce de roue à augets formés de tôle galvanisée, placée dans un cylindre horizontal rempli d'eau jusqu'à un niveau convenable. Le tuyau qui amène le gaz pénètre dans le cylindre par le haut d'une de ses extrémités, et vient déboucher dans l'axe de l'appareil en *c*. Le gaz en arrivant presse la palette *a* de l'auget A qu'il remplit, et fait tourner la roue. Sitôt qu'un auget est plein, mais seulement alors, il vient verser son gaz dans la partie supérieure du cylindre enveloppe, où se trouve le tuyau qui le conduit au bec d'éclairage. Comme tout le gaz est obligé de passer dans les augets, on conçoit que connaissant la capacité des augets et le nombre de tours de la roue, on a la quantité de gaz consommé. Les aiguilles de trois cadrans fixés sur le devant du compteur, mises en mouvement par la roue elle-même, indiquent les volumes de gaz débités.

Le compteur doit être monté parfaitement de niveau, dans un endroit frais, mais protégé contre la gelée, plus bas que les becs qu'il doit desservir. Tous les mois on doit s'assurer que l'eau a conservé son niveau dans le compteur; s'il y a une petite différence due à l'évaporation ou à la condensation, par des trous placés à des hauteurs convenables et fermés par des vis, on introduit ou on retire un peu d'eau. On a soin, pendant cette opération, de fermer le robinet de communication avec la canalisation de l'usine.

ÉTABLISSEMENT DES MANUFACTURES DITES INSALUBRES.

345. *Décret du 15 octobre* 1810. Ce décret divise les manufactures et ateliers répandant une odeur insalubre ou incommode en trois classes. Une ordonnance du roi du 14 janvier 1815 les divise de la même manière, et elle donne une nomenclature plus complète des établissements contenus dans chaque classe; nous allons reproduire cette nomenclature.

PREMIÈRE CLASSE.

Établissements et ateliers qui ne peuvent être formés dans le voisinage des habitations particulières, et pour lesquels il est nécessaire de se pourvoir d'une autorisation de Sa Majesté, accordée en conseil d'État.

(f.) signifie fabriques de.

Acide nitrique (eau forte) (f.).
Acide pyroligneux (f.), lorsque les gaz se répandent dans l'air sans être brûlés.
Acide sulfurique (f.), affinage de métaux au fourneau à coupelle ou au fourneau à réverbère.
Amidonniers.
Artificiers.
Bleu de Prusse (f.), lorsqu'on n'y brûle pas la fumée et le gaz hydrogène sulfuré.
Boyaudiers.
Cendres gravelées (f.), lorsqu'on laisse répandre la fumée en dehors.
Cendres d'orfèvres (traitement des), par le plomb.
Chanvre (rouissage du) en grand par son séjour dans l'eau.
Charbon de terre (épurage du) à vases ouverts.
Chaux (fours à) permanents.
Cordes à instruments (f.).
Cretonniers.
Cuirs vernis (f.).
Équarrissages.
Échaudoirs.
Encre d'imprimerie (f.).
Fourneaux (hauts).

. Les établissements de ce genre ne sont autorisés qu'autant que les entrepreneurs ont rempli les formalités prescrites par la loi du 21 avril 1810.
Glaces (f.).
Goudron (f.).
Huile de pied de bœuf (f.).
Huile de poisson (f.).
Huile de térébenthine et huile d'aspic (distillerie en grand).
Huile rousse (f.).
Litharge (f.).
Massicot (f.)
Ménageries.
Minium (f.).
Noir d'ivoire et noir d'os (f.), lorsqu'on n'y brûle pas la fumée.
Orseille (f.).
Plâtre (fours à) permanents.
Pompes à feu ne brûlant pas la fumée, (n° 304).
Porcheries.
Poudrettes.
Rouge de Prusse (f.) à vases ouverts.
Sel ammoniac ou muriate d'ammoniaque (f.), par le moyen de la distillation des matières animales.
Soufre (distillation du).

Suif brun (f.).
Suif en branches (fonderie du) à feu nu.
Suif d'os (f.).
Sulfate d'ammoniaque (f.) par le moyen de la distillation des matières animales.
Sulfate de cuivre (f.), au moyen du soufre et du grillage.
Sulfate de soude (f.) à vases ouverts.
Sulfures métalliques (grillage des) en plein air.
Tabac (combustion des côtes du) en plein air.
Taffetas cirés (f.).
Taffetas et toiles vernis (f.).
Tourbe (carbonisation de la), à vases ouverts.
Tripiers.
Tuileries, dans les villes dont la population dépasse 10000 âmes.
Vernis (f.).
Verres, cristaux et émaux (f.).

La demande en autorisation des établissements de la première classe est présentée au préfet, et affichée par son ordre dans toutes les communes, à 5 kilom. de rayon.

Outre cette affiche de demande, il est également procédé à des informations *de commodo et incommodo.*

Tout particulier est admis à présenter ses moyens d'opposition ; les maires des communes ont la même faculté.

S'il y a des oppositions, le conseil de préfecture donne son avis, sauf la décision du conseil d'État.

S'il n'y a pas d'opposition, la permission est accordée, s'il y a lieu, sur l'avis du préfet et le rapport de notre ministre de l'intérieur.

S'il s'agit de fabrique de soude, ou si la fabrique est établie dans la ligne des douanes, le directeur général des douanes est consulté.

Outre ces formalités, la formation des fabriques de ce genre ne peut avoir lieu qu'après que les agents forestiers en résidence sur les lieux ont donné leur avis sur la question de savoir si la production des bois dans le canton, et les besoins des communes environnantes, permettent d'accorder la permission.

L'autorité locale indique le lieu où les manufactures et ateliers compris dans la première classe peuvent s'établir, et exprime sa distance des maisons particulières. Tout individu qui fait des constructions dans le voisinage de ces manufactures et ateliers, après que la formation en a été permise, n'est plus admis à en solliciter l'éloignement.

DEUXIÈME CLASSE.

Établissements et ateliers dont l'éloignement des habitations n'est pas rigoureusement nécessaire; mais dont il importe néanmoins de ne permettre la formation qu'après avoir acquis la certitude que les opérations qu'on y pratique sont exécutées de manière à ne pas incommoder les propriétaires du voisinage, ni à leur causer des dommages.

Acier (f.).
Acide muriatique (f.), à vases clos.
Acide muriatique oxygéné (f.)
Acide pyroligneux (f.), lorsque les gaz sont brûlés.
Ateliers à enfumer les lards.
Blanc de plomb ou de céruse (f.).
Bleu de Prusse (f.), lorsqu'on brûle la fumée et l'hydrogène sulfuré.
Cartonniers.
Cendres d'orfévres (traitement des), par le mercure et la distillation des amalgames.
Cendres gravelées (f.), lorsqu'on brûle la fumée.
Chamoiseurs.
Chandeliers.
Chapeaux (f.).
Charbon de bois fait à vases clos.
Charbon de terre épuré, lorsqu'on travaille à vases clos.
Châtaignes (dessiccation et conservation des).
Chiffonniers.
Cire à cacheter (f.).
Corroyeurs.

Couverturiers.
Cuirs verts (dépôt de).
Cuivre (fonte et laminage de).
Eau-de-vie (distillerie d').
Faïence (f.).
Fondeurs en grand, au fourneau à réverbère.
Galons et tissus d'or et d'argent (broderie en grand des).
Genièvre (distilleries de).
Goudron (f.), à vases clos.
Hareng (saurage du).
Hongroyeurs.
Huiles (épuration des) au moyen de l'acide sulfurique.
Indigoteries.
Liqueurs (f.).
Maroquiniers.
Mégissiers.
Noir de fumée (f.).
Noir d'ivoire et noir d'os (f.), lorsqu'on brûle la fumée.
Or et argent (affinage d'), au moyen du départ et du fourneau à vent.
Os (blanchiment des), pour les éventaillistes et boutonniers.
Papier (f.).
Parcheminiers.
Pipes à fumer (f.).
Plomb (fonte de) et laminage de ce métal.
Poêliers-fournalistes.
Porcelaine (f.).
Potiers de terre.
Rouge de Prusse (f.), à vases clos.
Salaisons (dépôts de).
Sel ou muriate d'étain (f.).
Sucre (raffineries de).
Suif (fonderies de) au bain-marie ou à la vapeur.
Sulfate de soude (f.), à vases clos.
Sulfate de fer et de zinc (f.), lorsqu'on forme ces sels de toutes pièces avec l'acide sulfurique et les substances métalliques.
Sulfures métalliques (grillage des), dans les appareils propres à retirer le soufre ou à utiliser l'acide sulfureux qui se dégage.
Tabacs (f.).
Tabatières en carton (f.).
Tanneries.
Toiles (blanchiment des) par l'acide muriatique oxygéné.
Tourbe (carbonisation de la), à vases clos.
Tuiles et briqueteries.

L'autorisation de former les établissements et ateliers compris dans la seconde classe, est accordée sur une demande de l'entrepreneur adressée au sous-préfet de l'arrondissement, qui la transmet au maire de la commune dans laquelle on projette de former l'établissement, en le chargeant de procéder à des informations *de commodo et incommodo*. Ces informations terminées, le sous-préfet prend sur le tout un arrêté qu'il transmet au préfet ; celui-ci statue, sauf le recours à notre conseil d'État, par toutes parties intéressées.

S'il y a opposition, il y est statué par le conseil de préfecture, sauf le recours au conseil d'État.

TROISIÈME CLASSE.

Établissements et ateliers qui peuvent rester sans inconvénient auprès des habitations particulières, et pour la formation desquels il est néanmoins nécessaire de se munir d'une permission du préfet, qui prend préalablement l'avis du maire et de la police locale.

Les réclamations qui peuvent avoir lieu contra la décision prise, sont jugées au conseil de préfecture.

Acétate de plomb (sel de Saturne) (f.).
Batteurs d'or et d'argent.
Blanc d'Espagne (f.)
Bois doré (brûleries de).
Boutons métalliques (f.).
Borax (raffinage du).
Brasseries.
Briqueteries ne faisant qu'une seule fournée en plein air, comme on le fait en Flandre.
Camphre (préparation et raffinage du).
Caractères d'imprimerie (fonderies de).
Cendres (laveurs de).
Cendres bleues ou autres précipités de

cuivre (f.).
Chaux (fours à), ne travaillant pas plus d'un mois par année.
Ciriers.
Colle de parchemin et d'amidon (f.).
Corne (travail de la) pour la réduire en feuilles.
Cristaux de soude (f.), sous-carbonate de soude cristallisé.
Doreurs sur métaux.
Eau seconde (f.) des peintres en bâtiment, alcalis caustiques et dissolutions.
Encre à écrire (f.).
Essayeurs.
Fer-blanc (f.).
Feuilles d'étain (f.).
Fondeurs au creuset.
Fromages (dépôts de).
Glaces (étamage des).
Laques (f.).
Moulins à huile.
Ocre jaune (calcination de l'), pour la convertir en ocre rouge.
Papiers peints et papiers marbrés (f.).
Plâtre (fours à), ne travaillant pas plus d'un mois par année.
Plombiers et fontainiers.
Plomb de chasse (f.).
Pompes à feu, brûlant leur fumée (304).
Potasse (f.).
Potiers d'étain.
Sabots (ateliers à enfumer les).
Salpêtre (fabrication et affinage du).
Savonneries.
Sel de soude sec (f.), sous-carbonate de soude sec.
Sel (raffineries de).
Soude (f.), ou décomposition du sulfate de soude.
Sulfate de cuivre (f.), au moyen de l'acide sulfurique et de l'oxyde de cuivre, ou du carbonate de cuivre.
Sulfate de potasse (raffinage du).
Sulfate de fer et d'alumine, extraction de ces sels, des matériaux qui les contiennent tout formés, et transformation du sulfate d'alumine en alun.
Tartre (raffinage du).
Teinturiers.
Teinturiers-dégraisseurs.
Tueries, dans les communes dont la population est au-dessous de 10000 habitants.
Vacheries, dans les villes dont la population excède 5000 habitants.
Vert-de-gris et verdelet (f.).
Viandes (salaison et préparation des).
Vinaigre (f.).

L'accomplissement des formalités prescrites pour l'établissement des manufactures comprises dans ces trois classes, ne dispense pas de celles qui sont prescrites pour la formation des établissements qui sont placés dans le rayon des douanes ou sur une rivière, qu'elle soit navigable ou non.

Les attributions données aux préfets et aux sous-préfets, relativement à la formation des établissements répandant une odeur insalubre ou incommode, sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue du département de la Seine, et dans les communes de Saint-Cloud, de Meudon et de Sèvres, du département de Seine-et-Oise.

TROISIÈME PARTIE.

Machines à vapeur.

---

346. *Dénomination des machines à vapeur.*

Machine sans détente ni condensation. Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur agit à pleine pression pendant toute la course du piston, et où elle se dégage librement dans l'atmosphère après son action.

Machines à condensation sans détente. Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur agit à pleine pression pendant toute la course du piston; mais où elle se condense après son action, de manière à former un vide plus ou moins parfait derrière le piston.

Machines à détente sans condensation. Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur n'agit à pleine pression que pendant une partie de la course du piston, pour agir seulement en se détendant pendant le reste de la course, et dans lesquelles la vapeur se dégage librement dans l'atmosphère après son action.

Machines à détente et à condensation. Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur agit à pleine pression pendant une portion de la course du piston et par détente pendant l'autre portion, et dans lesquelles la vapeur se condense après son action.

Les machines à vapeur prennent encore les dénominations de:

Machines à basse pression. Ce sont les machines dans lesquelles la pression absolue de la vapeur dans la chaudière est inférieure à 2 atmosphères (305).

Machines à moyenne pression. Ce sont les machines où la pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie de 2 à 4 atmosphères.

Machines à haute pression. Ce sont celles où la pression absolue de la vapeur dans la chaudière dépasse 4 atmosphères. En Amérique, cette pression absolue est quelquefois portée à 10 et jusqu'à 12 atmosphères.

Dans l'industrie, on désigne aussi les machines à vapeur par le nom

de leurs inventeurs; mais alors on désigne plutôt un mode d'agencement de pièces imaginé par l'inventeur, que le mode d'emploi de la vapeur.

TRAVAIL THÉORIQUE PRODUIT PAR LA VAPEUR.

347. *Travail théorique produit par un kilogramme de vapeur, quand on ne fait pas usage de la détente.* En négligeant le frottement du piston et de sa tige, et en supposant un vide parfait sur l'une des faces du piston, le travail produit par un kilog. de vapeur agissant sur l'autre face est, en supposant qu'il n'y a pas refroidissement de la vapeur,

$$T_m = h\pi r^2 z = Vh.$$

T_m travail produit, en grandes unités dynamiques (33);
h pression de la vapeur sur le piston, exprimée en mètres de hauteur d'eau;
r rayon du piston, en mètres;
z espace parcouru par le piston, en mètres;
πr^2 surface du piston, en mètres carrés (*Int.*, 603);
$h\pi r^2$ force avec laquelle la vapeur sollicite le piston, en unités de 1000 kilogrammes;
$V = \pi r^2 z$ volume engendré par le piston ou volume d'un kilogramme de vapeur sous la pression h.

Si le vide n'existait pas derrière le piston, ou s'il n'était fait qu'imparfaitement, comme cela a toujours lieu en pratique, en désignant par h' la pression en mètres d'eau qui en résulterait derrière le piston, on aurait

$$T_m = Vh - Vh' = V(h - h').$$

TABLEAU des valeurs de $\mathcal{T}_m$, c'est-à-dire des quantités théoriques de travail produites par un kilogramme de vapeur à différentes pressions, suivant que h' = 10m.3329, *pression atmosphérique, ou que* h' = 0.

PRESSION ABSOLUE h DE LA VAPEUR		VALEUR DE $\pi r^2 z$, ou volume de 1 k. de vapeur (266).	VALEUR DE $\mathcal{T}_m$ en grandes unités dynamiques, quand	
en atmosphères.	en mètres de hauteur d'eau.		$h' = 0$.	$h' = 10^m.3329$.
		m.cub.		
0.25	2.583	6.114	15.79	— 47.39
0.50	5.166	3.191	16.49	— 16.49
0.75	7.750	2.209	17.12	— 5.71
1.00	10.333	1.696	17.52	0
1.25	12.916	1.381	17.84	+ 3.57
1.50	15.499	1.169	18.12	6.04
1.75	18.083	1.014	18.34	7.86
2.00	20.666	0.896	18.52	9.26
2.25	23.249	0.806	18.74	10.41
2.50	25.832	0.732	18.91	11.35
2.75	28.416	0.671	19.07	12.13
3.00	31.000	0.619	19.19	12.79
3.25	33.582	0.576	19.34	13.39
3.50	36.165	0.538	19.46	13.90
3.75	38.748	0.505	19.57	14.35
4.00	41.332	0.476	19.67	14.75
4.25	43.915	0.449	19.72	15.08
4.50	46.498	0.428	19.90	15.48
4.75	49.082	0.407	19.98	15.77
5.00	51.665	0.389	20.10	16.08
5.50	56.831	0.356	20.23	16.55
6.00	61.997	0.328	20.34	16.95
6.50	67.164	0.306	20.55	17.39
7.00	72.330	0.286	20.69	17.73
7.50	77.497	0.269	20.85	18.07
8.00	82.663	0.254	21.00	18.37
8.50	87.830	0.240	21.08	18.60
9.00	92.996	0.228	21.20	18.85
9.50	98.163	0.217	21.30	19.06
10.00	103.329	0.208	21.49	19.34

D'après ce tableau, on voit que l'avantage de la condensation de la vapeur derrière le piston diminue à mesure que la pression de la vapeur sur le piston augmente; en pratique, cet avantage n'est guère réel que pour les pressions qui ne dépassent pas 4 ou 5 atmosphères.

348. *Travail théorique produit par un kilogramme de vapeur d'eau quand on emploie la détente.* En admettant la loi de Clément Desormes (263), que la même quantité de chaleur suffit pour constituer vapeur 1 kilog. d'eau, quel que soit le volume de la vapeur, il s'ensuit que la loi de Mariotte sur l'influence de la pression sur le volume des gaz (257) s'applique à la vapeur comme aux gaz, et que, pour un même poids de vapeur, les volumes sont en raison inverse des pressions. Le changement de température de la vapeur modifie cette loi; mais comme dans

les machines à vapeur la température est peu différente pour les pressions auxquelles on emploie la vapeur, on peut négliger l'effet de la dilatation, dont le coefficient n'est que de 0,00367 environ par degré.

De ces hypothèses, il résulte que le travail total théorique produit par 1 kilog. de vapeur qui agit par détente pendant une portion de la course du piston est, en supposant un vide parfait derrière le piston,

$$\mathcal{T}_m = Vh + Vh \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2{,}3026.$$

$\mathcal{T}_m$ travail produit, en grandes unités dynamiques (83);
V volume en mètres cubes du kilog. de vapeur avant la détente, c'est-à-dire à la pression h (tableau du n° 347);
h pression de la vapeur avant la détente, en mètres de hauteur d'eau;
z course totale du piston, en mètres;
z_0 espace parcouru par le piston avant la détente;
Vh travail produit avant la détente (347);
$Vh \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2.3026$ travail produit par la détente.

Selon que dans une machine à vapeur à détente $\frac{z}{z_0}$ est égal à 2, 3, 4, etc., on dit que la détente est au 1/2, au 1/3, au 1/4, etc.

TABLEAU des valeurs de Vh log $\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2.3026$, *c'est-à-dire des quantités de travail théoriques produites par la détente d'un kilog. de vapeur, pour différentes valeurs de* $\frac{z}{z_0}$, *le travail* Vh *produit avant la détente* (347) *étant représenté par* 1.

VALEUR DE $\frac{z}{z_0}$.	TRAVAIL dû à la détente.	VALEUR DE $\frac{z}{z_0}$.	TRAVAIL dû à la détente.
1	0.000	7	1.946
2	0.693	8	2.079
3	1.098	9	2.197
4	1.386	10	2.3026
5	1.609	15	2.708
6	1.791	20	2.996

En pratique il ne convient guère d'aller au delà de $\frac{z}{z_0} = 10$; car, une fois cette limite dépassée, le vide imparfait derrière le piston et les divers frottements de la machine absorbent un travail plus considérable en général que celui correspondant produit par la vapeur; c'est-à-

dire qu'une fois le piston arrivé au point qui donne $\frac{z}{z_0} = 10$, le travail produit par la machine pendant le reste de la course du piston est négatif.

MACHINES A VAPEUR SANS DÉTENTE NI CONDENSATION.

349. *Effet d'une machine à vapeur sans détente ni condensation.* D'après ce qui a été dit n° 347, l'effet théorique produit par la vapeur dépensée en une seconde est

$$\mathcal{T}'_m = V(h-h') = \pi r^2 v(h-h').$$

$\mathcal{T}'_m$ travail développé par la vapeur dépensée en une seconde;
$V=\pi r^2 v$ volume engendré par le piston ou volume de vapeur dépensé par seconde;
v vitesse moyenne du piston par seconde;
h pression absolue de la vapeur dans le cylindre;
h' pression derrière le piston.

Pour avoir le travail moteur pratique que peut transmettre en une seconde l'arbre du volant de la machine, il faut affecter $\mathcal{T}'_m$ d'un coefficient k qui dépend des différentes résistances passives de la machine, et auquel on ne peut assigner de valeur moyenne qu'en estimant en bloc ces résistances; ainsi on a, en représentant par $\mathcal{T}_m$ ce travail pratique,

$$\mathcal{T}_m = k\mathcal{T}'_m = \pi r^2 vk(h-h').$$

On a théoriquement $h' = 10^m,333$, pression atmosphérique; mais, à cause de la petitesse de l'ouverture du tiroir, qui est le 1/25 de la section du cylindre dans les machines à basse pression, et le 1/60 seulement dans les machines à haute pression, la vapeur ne sort pas librement du cylindre, et on a $h' = 10^m,333$ plus 1/10 à 1/8 de $10^m,333$.

D'après M. Poncelet, quand le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière au cylindre a un diamètre convenable, la tension de la vapeur est de 1/20 moins élevée dans la chemise que dans la chaudière; mais il convient, dans l'établissement d'une machine, afin de ne pas être en défaut, de compter, pour des pressions de 4 à 5 atmosphères, que la tension absolue de la vapeur est de 1/2 atmosphère moins élevée dans le cylindre que dans la chaudière.

Le diamètre du tuyau d'amenée de vapeur varie du 1/7 au 1/8 de celui du piston; cependant, pour une machine de 12 à 16 chevaux, il ne convient guère de donner à ce tuyau moins de $0^m,055$ de diamètre.



TABLEAU des valeurs moyennes du coefficient k *pour des machines en bon état ordinaire d'entretien.*

FORCE DE LA MACHINE.	VALEUR DE k.
De 4 à 8 chevaux.	0.61
De 10 à 20 *id.*	0.70
De 30 à 50 *id.*	0.79
De 60 à 100 *id.*	0.85

En tenant la machine dans un mauvais état d'entretien, les valeurs du coefficient k diminuent sensiblement; il convient, pour l'établissement d'une machine qui doit être bien tenue, de ne compter que sur les valeurs précédentes.

350. *Calcul des dimensions d'une machine sans condensation ni détente.* Soit à déterminer, par exemple, les dimensions d'une telle machine capable de faire fonctionner la machine soufflante du haut fourneau de Framont. Ce fourneau, marchant au charbon de bois, rapporte M. Morin, a $9^m,10$ de hauteur; la machine lui fournit par seconde $0^{m.c.},462$ d'air froid à la pression de $0^m,049$ de mercure près de la buse, qui a $0^m,08$ de diamètre; le rapport du volume d'air lancé au volume engendré par le piston est de 0,718, et le travail absorbé est de 8 chevaux.

Pression absolue de la vapeur dans le cylindre 3.5 atmosphères; il conviendrait de timbrer la chaudière à 4 atmosphères environ (306);
Vitesse moyenne du piston par seconde $0^m,90$;
Valeur de $k = 0,61$;
Valeur de $h = 10^m,333 \times 3,5 = 36^m,17$;
Valeur de $h' = 10^m,333 \times 1,125 = 11^m,63$.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule

$$T_m = \pi r^2 vk\,(h - h'),$$

on a

$$8 \times 0,075 = 3,14 \times r^2 \times 0,90 \times 0,61\,(36,17 - 11,63),$$

d'où on tire $r = 0^m,12$, et par suite le diamètre du piston $d = 0^m,24$.

Le volume de vapeur dépensé est, par seconde,

$$\pi r^2 v = 3,14 \times 0,12 \times 0,12 \times 0,90 = 0^{m.c.},0407,$$

et par heure

$$0^{m.c.},0407 \times 3600 = 147 \text{ mètres cubes.}$$

La densité de la vapeur à 3,5 atmosphères étant 0,00185886 (n° 266), le poids de vapeur dépensé par heure est

$$1^k,859 \times 147 = 273 \text{ kilog.}$$

Comme dans une machine, même bien faite, il y a 1/20 de perte de vapeur, la dépense de vapeur est donc $273 + \frac{273}{20} = 287$ kilog.; quantité qu'il faut encore augmenter de son 1/10 environ, pour tenir compte du refroidissement de toutes les parties qui contiennent la vapeur, et qu'on suppose ne donner lieu à aucune fuite; de sorte que, pour obtenir la force de 8 chevaux, il faut former 316 kilog. de vapeur, c'est-à-dire 39 kilog. environ par force de cheval.

Supposant que 1 kilog. de houille produise 5,50 kilog. de vapeur (300), on en brûlera $\frac{316}{5,50} = 57,5$ kil. pour obtenir la force de 8 chevaux; ce qui fait 7,2 kil. par force de cheval et par heure. Pour une plus forte machine, cette quantité serait moindre.

On peut diminuer la consommation de combustible de 1/10 environ en chauffant à 70° ou 80° l'eau d'alimentation, qui est moyennement à 12°, avec la vapeur qui sort du cylindre.

Supposant que chaque mètre carré de surface de chauffe produise 20 kilog. de vapeur (299), cette surface sera de $\frac{316}{20} = 15^{m.c.},80$; ce qui fait $1^{m.c.},98$ par force de cheval. Cette surface serait moins considérable pour des machines puissantes. A cause des fuites accidentelles de vapeur qui peuvent avoir lieu, il vaut toujours mieux avoir un excès de surface de chauffe.

Dans toutes les machines à vapeur, on devrait prendre la hauteur du cylindre égale au diamètre, afin que, pour un même volume, la surface totale du cylindre, qui est une surface refroidissante à l'intérieur aussi bien qu'à l'extérieur, fût un minimum; mais pour diminuer le renouvellement des espaces nuisibles, on augmente la hauteur du cylindre. Les machines sans détente ni condensation consommant beaucoup de combustible, elles ne sont employées que dans les cas où la machine doit être simple, ou dans les localités riches en combustible, et l'on tient peu compte du refroidissement du cylindre, dont la hauteur varie de 1,8 à 2,5 fois le diamètre.

On peut rendre bien étanche le piston en donnant à sa garniture métallique une hauteur de $0^m,05$ à $0^m,06$.

En Angleterre, la vitesse du piston est de 3 pieds par seconde ($0^m,914$); en France, elle varie de $0^m,80$ à $1^m,10$; en Amérique, on l'a portée à 2 mètres, $2^m,50$ et même 3 mètres. Dans les locomotives (quatrième partie), la course des pistons étant de $0^m,46$, et le diamètre des roues motrices de $1^m,67$, ce qui fait $5^m,24$ de circonférence, à la vitesse de 10 lieues à l'heure, chaque piston parcourt en une seconde

$$\frac{10 \times 4000}{3600} \times \frac{2 \times 0,46}{5,24} = 1^m,95.$$

Le nombre de coups de piston (un coup de piston comprend une montée et une descente), c'est-à-dire de tours de volant, varie de 25 à 30 par minute pour des machines de 15 à 20 chevaux; au-dessous de 15 chevaux, on va à 35 et même 40 coups. Dans l'exemple précédent de locomotives, le nombre de coups est 127.

La pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie de 5 à 6 atmosphères; au-dessus de cette limite, les fuites de vapeur et les sujétions engendrées par une aussi forte pression compensent l'augmentation de travail; de plus, la marche de la machine est irrégulière. En France, on ne dépasse pas 7 atmosphères; en Angleterre, on se tient ordinairement entre 3 et 4 atmosphères; en Amérique, on se trouve bien de marcher à 10 atmosphères, et on atteint jusqu'à 12 atmosphères.

351. *Travail absorbé par l'alimentation d'une chaudière.* Lorsque la pression absolue dans la chaudière est une atmosphère, le travail théorique absorbé pour y introduire un kilogramme d'eau est nul; si cette pression est 2 atmosphères, ce travail est 10,333 kilogrammètres, et si elle est $n+1$ atmosphère, ce travail devient $10,333 \times n$ kilogrammètres: ainsi, pour $n+1=3$ atmosphères, il est $10,333 \times 2 = 20^{k.m.},666$. Le travail pratique est double du travail théorique; de sorte que dans ce cas il est de 41.332 kilogrammètres, c'est-à-dire les 0,0032 de l'effet théorique 12790 kilogrammètres, produit par 1 kilog. de vapeur à la même pression et sans condensation (347). Ce rapport augmente rapidement avec la pression; ainsi à $n+1=6$ atmosphères, il est 0,0061, et à $n+1=10$ atmosphères, 0,0096.

352. *Volant.* Le volant se calcule à l'aide de la formule

$$P = \frac{4645n}{mV^2} K, \qquad \text{(page 65)}$$

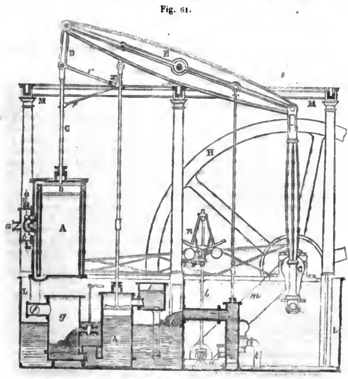
dans laquelle, pour les machines à balancier et pour le coefficient de régularité de Watt $K=32$, le coefficient numérique 4645 est applicable aux bielles infinies, et devient 5227, 5528, 5829, suivant que la longueur de la bielle est respectivement égale à 6, 5, 4 fois celle de la manivelle. Pour les machines sans balancier, la longueur de la bielle étant égale à 5 fois celle de la manivelle, pour $K=32$, le coefficient numérique est respectivement 5592, 1531, 416 pour une manivelle simple, deux manivelles à angle droit, trois manivelles faisant des angles égaux.

MACHINES A VAPEUR A CONDENSATION SANS DÉTENTE.

353. Les machines à condensation sans détente sont les machines dites de Watt, dans lesquelles la pression de la vapeur est ordinairement inférieure à 1,25 atmosphère.

La fig. 61 est la coupe par l'axe d'une de ces machines. Quoiqu'il n'y ait peut-être pas deux constructeurs qui composent leurs machines identiquement l'un comme l'autre, quand on aura bien compris la description suivante, on ne sera nullement embarrassé pour s'expliquer le mécanisme d'une machine à vapeur quand on la verra toute montée ou en dessin, quel que soit du reste le système de la machine.

Fig. 61.



A cylindre à vapeur, entouré d'une enveloppe en fonte pour diminuer le refroidissement :

B piston ;

C tige ;

D *grandes chapes* du parallélogramme ; elles s'articulent avec le balancier et avec un petit axe qui porte un manchon dans lequel se fixe le haut de la tige C ;

x *chapes de la pompe à air* et de la pompe alimentaire ; elles sont reliées au milieu de leur longueur par un axe auquel sont fixées les tiges des pompes à air et à eau froide ;

r *guides* formant un parallélogramme avec l'axe du balancier et les chapes ; ils s'articulent à leurs extrémités avec des axes, dont l'un est percé d'une lunette pour laisser passer les tiges de pompes ;

p *contre-guides* ou *contre-balanciers*; ils s'articulent à une extrémité avec le petit axe à lunette dont il vient d'être question, et à l'autre à de petits axes fixés à l'entablement de la machine. Le mouvement horizontal de ces contre-guides étant contraire à celui du balancier, il en résulte que la tige C et celles des pompes se meuvent verticalement;

E balancier; il communique le mouvement à la manivelle G, par l'intermédiaire de la bielle;

G manivelle fixée sur l'arbre moteur;

H volant monté sur l'arbre moteur;

L bache en fonte dans et sur laquelle sont fixés les différents organes de la machine;

M entablement en fonte;

a tuyau qui amène la vapeur; il est garni d'une valve destinée à régler l'arrivée de la vapeur;

b caisse en fonte dans laquelle arrive la vapeur;

d et e canaux établissant la communication entre la caisse b et le haut et le bas du cylindre;

o canal communiquant avec le condenseur;

c tiroir destiné à distribuer la vapeur. Le piston B étant arrivé en haut de sa course, supposons que la tige z fasse baisser le tiroir, le canal d débouche dans la caisse b et la vapeur arrive sur le piston, tandis que le canal o se met en communication avec celui e et la vapeur qui est sous le piston va au condenseur. Le piston étant arrivé au bas de sa course, la tige z soulève le tiroir, le canal e communique avec la boîte b, celui d avec le condenseur, le piston B remonte, et ainsi de suite;

f tuyau par lequel la vapeur se rend du canal o dans le condenseur;

g condenseur; un robinet dont la tige s'élève au-dessus du niveau de l'eau dans la bache L règle l'entrée de l'eau dans le condenseur;

h *pompe à air*; elle est destinée à retirer l'eau chaude du condenseur. La pompe d'alimentation de la chaudière étant placée à côté de la pompe à air, elle est invisible dans le dessin; elle foule une partie de l'eau chaude du condenseur dans la chaudière;

i réservoir dans lequel la pompe à air élève l'eau;

u tuyau de départ de l'eau du réservoir i;

K pompe élévatoire fournissant toute l'eau froide nécessaire au service de la machine;

t tuyau d'aspiration de l'eau froide;

n pendule conique (121);

s levier coudé recevant le mouvement du manchon inférieur du pendule et le transmettant, par l'intermédiaire d'une tige, à la valve régulatrice a;

l axe du pendule conique;

m courroie passant sur l'arbre moteur et transmettant, par l'intermédiaire de roues coniques, le mouvement à la tige l du pendule conique.

Le fond et le couvercle du cylindre se garnissent de robinets.

354. *Effet d'une machine à vapeur à condensation sans détente.* D'après ce qui a été dit (347), l'effet théorique $\mathcal{T}'_m$ produit dans une telle machine, par la vapeur dépensée en une seconde, est, en représentant par h' la pression due au vide imparfait derrière le piston,

$$\mathcal{T}_m = V(h-h') = \pi r^2 v(h-h').$$

Le travail pratique dont on peut disposer sur l'arbre du volant est

$$\mathcal{T}_m = k\mathcal{T}'_m = \pi r^2 vk(h-h'). \qquad (a)$$

Les différentes lettres de ces formules ont les mêmes significations qu'aux nos 347 et 349.

TABLEAU des valeurs moyennes du coefficient k.

FORCE DE LA MACHINE.	VALEUR DE *k*.
De 4 à 8 chevaux.	0.60
De 10 à 20 *id.*	0.67
De 30 à 50 *id.*	0.73
De 60 à 100 *id.*	0.78

355. *Calcul des dimensions d'une machine à condensation sans détente.* Soit à déterminer les dimensions d'une machine capable de faire fonctionner 62 machines à lainer les draps, semblables à celles de l'établissement de la Vierge, à Sedan, où, d'après M. Poncelet, une machine 20 chevaux en fait fonctionner 50.

La force de la machine est de 25 chevaux environ. Supposons la pression absolue de la vapeur dans le cylindre égale à une atmosphère, la pression derrière le piston à 1/7 d'atmosphère, et la vitesse moyenne du piston à 1 mètre par seconde.

On a $k=0,70$, $h=10^m,333$, $h'=1^m,476$ et $v=1$ mètre.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule précédente (a), on a

$$25\times 0,075 = 3,14\times r^2\times 1\times 0,70\,(10,333-1,476);$$

d'où on tire $r=0^m,31$, et par suite le diamètre du piston $d=0^m,62$.

Le volume de vapeur dépensé par seconde est

$$\pi r^2 v = 3,14\times 0,31\times 0,31\times 1 = 0^{m\,cub.},302;$$

ce qui fait par heure

$$0,302\times 3600 = 1086 \text{ mètres cubes.}$$

A 1 atmosphère, la densité de la vapeur étant 0,00058955 (n° 266), le poids de vapeur dépensé par heure est

$$0,58955\times 1086 = 640 \text{ kilogrammes.}$$

Dans une bonne machine de ce genre, il faut augmenter cette dépense de vapeur de 1/10 pour tenir compte des pertes qui ont lieu dans les tiroirs, entre les fonds du cylindre et le piston, par les fuites et

par le refroidissement; de sorte que la dépense réelle de vapeur est de 704 kilog. par heure.

En alimentant avec de l'eau à 40°, 1 kilog. de houille produisant facilement 6 kilog. de vapeur (300), on en brûlera $\frac{704}{6} = 117{,}33$ kilog. pour obtenir la force de 25 chevaux; ce qui fait 4,70 kilog. par force de cheval et par heure. En pratique, cette consommation est ordinairement de 5 à 6 kilog. pour les petites machines, et de 4k,50 à 5 kilog. pour les grandes.

Supposant que chaque mètre carré de surface de chauffe produise 25 kilog. de vapeur à l'heure (299), cette surface sera de $\frac{704}{25} = 28{,}16$ mètres carrés, ce qui fait 1m.c.,13 par force de cheval; ordinairement on ne prend qu'un mètre carré par force de cheval.

La surface refroidissante du cylindre est la plus petite possible, pour le même volume, quand la hauteur du cylindre est égale à son diamètre (350). En enveloppant le cylindre d'un corps mauvais conducteur de la chaleur, on rendrait presque nul le refroidissement extérieur. La chemise que l'on met au cylindre empêche la vapeur de se condenser contre ses parois, chaque fois qu'il est mis en communication avec le condenseur. Le rapport de la longueur au diamètre du cylindre, adopté par Watt et Boulton, a varié de 1,75 jusqu'à 3; mais la valeur la plus commune est 2,7.

La vitesse du piston varie de 0m,90 à 1m,10 par seconde; on va à 1m,50 pour les fortes machines de 70 chevaux. Le nombre de tours de volant varie de 20 à 28 par minute.

La condensation permet de marcher à de très-basses pressions; ainsi dans les machines de Watt, avec chaudière en tombeau, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie ordinairement de 1 atmosphère 1/4 à 1 atmosphère 1/5, et la pression dans le cylindre est quelquefois inférieure à 1 atmosphère, mais le plus souvent elle est 1 atmosphère. La pression absolue de la vapeur dans le cylindre étant 1 atmosphère, il convient de timbrer la chaudière à 1 atmosphère 1/4.

Le diamètre du tuyau qui conduit la vapeur de la chaudière aux tiroirs est le 1/5 au moins de celui du cylindre, d'où il résulte que la vitesse du piston est à celle de la vapeur dans ce tuyau comme 1 est à 25. La section de tous les passages et orifices de circulation de la vapeur est aussi égale au 1/25 de celle du piston. La valve régulatrice ne doit intercepter que les 0.25 de ce passage dans sa position normale. La largeur des lumières se prend environ égale à quatre ou cinq fois leur hauteur, et l'ouverture réellement démasquée par le tiroir ne peut pas être sensiblement moindre que 1/25 de la surface du piston.

Les passages et tuyaux de départ de vapeur doivent avoir des sections au moins égales à celles des orifices et tuyaux d'admission.

356. *Quantité d'eau nécessaire à la condensation de la vapeur. Capacité du condensateur et de la pompe à air. Pompe de puits.*

Le poids d'eau nécessaire pour condenser la vapeur dépensée est donné par la formule

$$Q\,(t'-t) = P\,(650-t'),$$

d'où on tire

$$Q = \frac{P\,(650-t')}{t'-t}.$$

Q poids d'eau nécessaire ;
P poids de vapeur dépensé ;
650 nombre d'unités de chaleur contenu dans un kilogramme de vapeur (263) ;
t température de l'eau avant la condensation ;
t' température de l'eau après la condensation.

Supposant $P = 1$ kilog., $t = 10°$ et $t' = 50°$, on a.

$$Q = \frac{650-50}{40} = 15 \text{ kilog.};$$

ce qui fait à peu près 15 litres.

TABLEAU de la quantité d'eau, à différentes températures, nécessaire pour condenser un kilogramme de vapeur, et de la pression dans le condenseur, en négligeant la force élastique de l'air que laisse dégager l'eau, force élastique qui s'ajoute à celle de la vapeur (268).

TEMPÉRATURE de l'eau avant la condensation	TEMPÉRATURE de l'eau après la condensation.	PRESSION dans le condenseur 266	VOLUME d'eau employé.
		atmosph	litres.
10°	50°	$\frac{1}{8,6}$	15,00
Id.	40	$\frac{1}{14,3}$	20.33
Id.	30	$\frac{1}{25}$	31.00

L'eau de rivière contient ordinairement 1/20 de son volume d'air; cet air se dégage dans le condenseur et produit une pression qui est en raison inverse de la capacité du condenseur, et qui s'ajoute à la force élastique de la vapeur. Ainsi en condensant à 50°, ce qui correspond à 1/8,6 atmosphère de pression, les 15 litres d'eau froide employés contiennent $\frac{15}{20} = 0^l,75$ d'air à la pression atmosphérique; supposant que la capacité que cet air occupe dans le condenseur soit de $0,75 \times 8.6 = 6^l,45$, sa force élastique devient égale, en négligeant l'effet de la

dilatation, à 1/8,6 atmosphère, et cette force élastique s'ajoutant à celle de la vapeur qui est aussi 1/8,6 atmosphère, la pression dans le condenseur est $\frac{1}{8,6} + \frac{1}{8,6}$ atmosphère. Si la capacité occupée par l'air dans le condenseur était 6.45 × 2 litres, sa force élastique ne serait plus que de $\frac{1}{8,6 \times 2}$, et la pression dans le condenseur serait réduite à $\frac{1}{8,6} + \frac{1}{8,6 \times 2}$ atmosphère. On voit donc que la pression dans le condenseur est d'autant plus petite que la capacité du condenseur est plus grande. Watt a reconnu que, pour des pressions absolues de 1 atmosphère 1/4 à 1 atmosphère 1/3 de la vapeur dans la chaudière, le volume de la pompe à air devait être le 1/8 de celui du cylindre à vapeur, et le volume du condenseur égal à celui de la pompe à air. Avec ces proportions, la pression derrière le piston à vapeur n'est pas très-grande, et le travail absorbé par le frottement du piston de la pompe à air, travail qui dépend du diamètre et de la course de ce piston, ne dépasse pas une limite raisonnable.

La pression dans le condenseur et par suite derrière le piston, le volume d'eau et d'air à extraire du condenseur, et la profondeur de laquelle on est obligé d'élever l'eau de condensation, guident dans le choix de la température à laquelle il convient de condenser. Pour des profondeurs de puits de 8 à 10 mètres, il convient de condenser à 35 ou 40°; pour des puits plus profonds, on condense à 44 et même 50°, et on ne doit plus condenser dès que la profondeur du puits atteint 30 ou 40 mètres.

La profondeur de puits à laquelle on peut se passer de pompe élévatoire est au maximum de 6 mètres ou 6^{m},50; au delà de cette limite, malgré le grand diamètre qu'il convient toujours de donner au tuyau d'aspiration, l'eau n'arrive plus dans le condenseur avec une vitesse suffisante.

Pour la machine de 25 chevaux (355), en condensant à 40°, avec de l'eau froide à 10°, la quantité d'eau froide nécessaire à la condensation des 704 kilog. de vapeur dépensés par heure sera de

$$704 \times \frac{650 - 40}{40 - 10} = 14312 \text{ kilog.};$$

ce qui fait 573 kilog. par force de cheval.

Cette quantité est un minimum que l'on ne peut atteindre en pratique; l'expérience prouve que la pompe de puits doit élever 1000 kilog. d'eau par force de cheval et par heure, c'est-à-dire 25000 kilog. pour une machine de 25 chevaux. Quand la machine marche bien, 1/5 de cette eau reste disponible.

357. *Volant.* Il se calcule avec la même formule et les mêmes coefficients que pour les machines sans détente ni condensation (352).

358. L'*Artisan-Club*, réunion d'ingénieurs et de mécaniciens, qui a fait paraître à Londres, sous le patronage du gouvernement, un nouveau traité de la machine à vapeur, donne la formule suivante pour calculer les proportions du cylindre à vapeur (extrait du Traité des machines à vapeur de MM. Bataille et Jullien):

$$P = \frac{d^2 \sqrt[3]{l}}{47}. \qquad (a)$$

P force de la machine en chevaux-vapeur;
d diamètre du cylindre en pouces;
l course du piston en pieds.

P étant toujours exprimé en chevaux-vapeur, mais d en centimètres et l en décimètres, la formule précédente devient

$$P = \frac{d^2 \sqrt[3]{l}}{437}.$$

Quoique le traité de l'Artisan-Club n'indique pas à quel genre de machines s'applique cette formule, comme la pression de la vapeur n'y entre pas, il est évident qu'elle ne peut s'appliquer qu'à une pression déterminée. Comme, en partant des bases d'établissement des machines de Boulton et Watt, qui fonctionnent toutes avec une pression moyenne effective de 7 livres par pouce carré (0^k,492 par centimètre carré), et une vitesse de piston, exprimée en pieds par minute, égale à environ 128 fois la racine cubique de la course, on parvient à l'expression (a) pour la puissance de la machine, on doit admettre que c'est aux machines à basse pression que s'applique cette formule, qui a servi à calculer la table suivante, qui donne les valeurs de P en chevaux.

… de cylindre en pouces anglais et en centimètres.		$1^p = 3^{dm}.05$	$1^p.5 = 4^{dm}.57$	$2^p = 0^{dm}.10$	$2^p.5 = 7^{dm}.02$	$3^p = 9^{dm}.14$	$3^p.5 = 10^{dm}.7$	$4^p = 12^{dm}.2$	$4^p.5 = 13^{dm}.7$	$5^p = 15^{dm}.2$	$5^p.5 = 16^{dm}.8$	$6^p = 18^{dm}.3$	$6^p.5 = 19^{dm}.8$	$7^p = 21^{dm}.3$	$7^p.5 = 22^{dm}.9$	$8^p = 24^{dm}.4$	$8^p.5 = 25^{dm}.9$	$9^p = 27^{dm}.4$	$9^p.5 = 29^{dm}.0$
p.	cm.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.
1 =	2.54	0.021	0.024	0.027	0.029	0.031	0.032	6.034	0.035	0.036	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.043	0.044	0.045
2 =	5.08	0.085	0.097	0.107	0.116	0.123	0.129	0.135	0.141	0.146	0.150	0.155	0.159	0.163	0.167	0.170	0.174	0.177	0.180
3 =	7.02	0.191	0.219	0.241	0.200	0.270	0.291	0.304	0.316	0.327	0.388	0.348	0.357	0.300	0.375	0.383	0.391	0.398	0.406
4 =	10.2	0.340	0.390	0.429	0.402	0.491	0.517	6.540	0.502	0.582	0.600	0.019	0.035	0.051	0.666	0.681	0.695	0.708	0.721
5 =	12.7	0.532	0.009	0.070	0.722	0.707	0.808	9.844	0.878	0.910	0.939	0.966	0.998	1.02	1.04	1.00	1.08	1.11	1.13
0 =	15.2	0.766	0.877	0.965	1.04	1.10	1.16	1.22	1.26	1.31	1.35	1.39	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.02
7 =	17.8	1.04	1.19	1.31	1.41	1.50	1.58	1.65	1.72	1.78	1.84	1.89	1.95	1.99	2.04	2.09	2.13	2.17	2.21
8 =	20.8	1.36	1.56	1.72	1.85	1.96	2.07	2.16	2.25	2.33	2.40	2.47	2.54	2.60	2.07	2.72	2.78	2.83	2.88
9 =	22.9	1.72	1.97	2.17	2.84	2.49	2.62	2.74	2.84	2.95	3.04	3.13	3.22	3.30	3.37	3.45	3.52	3.59	3.05
10 =	25.4	2.13	2.44	2.68	2.89	3.07	3.23	3.38	3.51	3.04	3.76	3.87	3.97	4.07	4.10	4.26	4.34	4.43	4.51
11 =	27.9	2.57	2.95	3.21	3.49	3.77	3.01	4.15	4.25	4.40	4.54	4.08	4.80	4.92	5.04	5.15	5.25	5.35	5.45
12 =	30.5	3.06	3.51	3.86	4.16	4.42	4.05	4.86	5.06	5.24	5.41	5.57	5.72	5.80	5.99	0.13	6.25	0.37	6.49
13 =	33.0	3.00	4.12	4.53	4.88	5.19	5.46	5.64	5.94	6.15	6.35	0.53	0.71	6.88	7.04	7.19	7.34	7.48	7.02
14 =	35.6	4.17	4.77	5.25	5.06	6.01	6.33	6.62	6.88	7.13	7.36	7.58	7.78	7.98	8.16	8.34	8.51	8.67	8.83
15 =	38.1	4.77	5.48	6.03	6.50	6.90	7.27	7.60	7.90	8.19	8.45	8.70	8.93	9.16	9.37	9.57	9.77	9.96	10.14
10 =	40.6	5.45	6.23	0.86	7.39	7.86	8.27	8.05	8.99	9.31	9.01	9.90	10.10	10.42	10.06	10.89	11.12	11.33	11.54
17 =	43.2	6.15	7.04	7.75	8.35	8.86	9.34	9.76	10.15	10.52	10.85	11.17	11.47	11.76	12.04	12.30	12.55	12.79	13.02
18 =	45.7	6.89	7.89	8.08	9.36	9.94	10.47	10.94	11.38	11.79	12.17	12.53	12.86	13.19	13.49	13.79	14.07	14.34	14.00
19 =	48.3	7.08	8.79	9.08	10.42	11.17	11.66	12.19	12.08	13.13	13.56	13.96	14.33	14.09	15.03	15.36	15.07	15.98	16.27
20 =	50.8	8.51	9.74	10.72	11.55	12.27	12.92	13.51	14.05	14.55	15.02	15.46	15.88	16.28	16.60	17.02	17.37	17.70	18.02
21 =	53.3	9.88	10.89	11.82	12.73	13.53	14.25	14.89	15.49	10.04	16.56	17.05	17.51	17.94	18.36	18.77	19.15	19.52	19.87
22 =	55.9	10.30	11.79	12.97	13.98	14.85	15.03	16.02	17.30	17.65	18.18	18.71	19.22	19.70	20.16	20.00	21.01	21.42	21.81
23 =	58.4	11.25	12.88	14.18	15.28	10.22	17.05	18.40	15.58	19.25	19.87	20.45	21.01	21.58	22.04	22.51	22.97	23.41	23.83
24 =	61.0	12.26	14.08	15.44	16.03	17.07	18.61	19.45	20.23	20.95	21.63	22.27	22.87	23.44	23.99	24.51	25.01	25.49	25.90
25 =	63.5	13.30	15.22	16.75	18.05	19.18	20.19	21.11	21.95	22.74	23.47	24.16	24.82	25.44	26.03	26.59	27.14	27.66	28.16
26 =	06.0	14.39	10.46	18.12	19.52	20.75	21.84	22.56	23.75	24.60	25.39	20.14	20.84	27.51	28.15	28.78	29.35	29.92	30.46
27 =	68.6	15.51	17.75	19.54	21.05	22.37	23.55	24.62	25.61	20.52	27.38	28.18	28.95	29.67	30.36	31.02	31.06	32.20	32.85
28 =	71.1	10.08	19.09	21.02	22.04	24.00	25.33	26.48	27.54	28.32	29.44	30.31	31.13	31.90	32.05	33.36	34.04	34.69	35.33
29 =	73.7	17.89	20.48	22.54	24.28	25.81	27.17	28.41	29.54	30.60	31.59	32.48	33.35	34.18	34.98	35.79	36.48	37.17	37.85

30 = 76.2	19.15	21.92	24.13	25 99	27.62	26.67	30.40	31.61	32.74	33.86	34.86	35.74	36.63	37.48	38.36	36.08	39.83	40.36
31 = 78.7	20.45	23.41	25.76	27.75	29.49	31.04	32.45	33.76	34.96	36.09	37.15	38.20	39.17	40.07	40.89	41.77	42.58	43.35
32 = 81.3	21.79	24.96	27.51	29.57	31.42	33.08	34.56	35.67	37.26	38.46	39.56	40.66	41.68	42.64	43.57	44.46	45.32	46.14
33 = 83.8	23.17	26.52	26.19	31.46	33.40	35.18	36.80	38.25	39.62	46.90	42.16	43.24	44.32	45.36	46.34	47.28	48.16	49.07
34 = 86.4	24.60	28.19	36.99	33.39	35.44	37.34	36.64	40.66	42.06	43.41	44.06	45.96	47.65	48.14	49.16	50.20	51.16	52.08
35 = 88.6	26.06	29.84	32.84	35.37	37.56	36.57	41.37	43.03	44.57	46.06	47.36	48.64	49.85	51.01	52.13	53.19	54.21	65.26
36 = 61.4	27.572	31.56	34.74	37.42	36.77	41.87	43.77	45.52	47.15	48.67	50.11	51.46	52.75	53.97	55.15	56.28	57.36	58.46
37 = 64.6	29.13	33.34	36.70	39.53	41.97	44.18	46.35	48.10	46.81	51.42	52.86	54.32	55.84	56.97	58.26	59.40	60.55	61.64
38 = 96.5	30.72	35.17	38.71	41.69	44.46	46.64	48.77	50.72	52 54	54.23	55.83	57.34	58.78	60.13	61.45	62.76	63.61	65.06
39 = 69.1	32.36	37.04	40.77	43.92	46.66	49.13	51.76	53.03	55.35	57.12	58.81	60.39	61.61	63.34	64.72	66.05	67.31	68.54
40 = 102	34.04	38.97	42.89	46.20	46.10	51.66	54.04	56.20	58.21	60.06	61.86	63.53	65.12	66.63	68.08	69.47	70.81	72.10
41 = 104	35.77	46.94	45.06	48.54	51.58	54.59	57.38	56.45	61.15	63.14	64.90	66.74	68.45	70.00	71.53	72.69	74.30	75.76
42 = 107	37.53	42.96	47.29	56.94	54.13	56.98	59.58	61.66	64.18	66.25	68.21	70.04	71.78	73.45	75.06	76.60	78.06	79.46
43 = 169	39.34	45.03	46.57	53.39	56.75	59.41	61.84	64.55	67.28	69.44	71.49	73.42	75.25	77.00	78.68	80.28	81.82	83.32
44 = 112	41.19	47.15	51.96	55.91	59.38	62.54	66.46	68.60	70.44	72.71	74.85	76.87	78.76	80.63	82.38	84.06	85.68	87.23
45 = 114	43.08	49.32	54.28	58.48	62.14	65.42	68.39	71.13	73.67	76.05	78.30	80.41	82.43	84.33	86.17	87.63	89.63	91.26
46 = 117	45.02	51.54	56.72	61.10	64.88	68.16	71.43	74.33	76.96	79.47	81.81	84.02	86.12	88.14	90.04	91.86	93.64	95.34
47 = 119	47.00	53.86	59.22	63.79	67.08	71.03	74.92	77.60	80.38	82 97	85.40	87.71	89.90	62.01	94.00	95.61	97.76	99.54
48 = 122	46.02	56.11	61.76	66.53	70.70	74.42	77.82	80.94	83 83	86.53	86.08	91.49	63.78	95.65	98.04	100.6	102.0	103.8
49 = 124	51.08	58.48	64.36	69.33	73.78	77.88	80.78	84.35	87.36	90.16	62.82	95.34	67.73	100.6	102.2	104.3	106.3	108.2
56 = 127	53.19	66.89	67.02	72.16	76.71	86.76	84.44	87.82	66.96	93.86	66.65	69.27	101.7	104.1	106.4	108.5	110.6	112.6
51 = 129	55.3	63.35	69.72	75.11	79.34	84.62	87.85	61 36	94.03	97.68	160.6	103.2	105.8	108.3	110.7	112.9	115.1	117.2
52 = 132	57.55	65.86	72.48	78.08	83.06	87.35	90.25	64.98	98.46	101.55	104.5	107.4	110.6	112.6	115.1	117.4	119.6	121.8
53 = 135	59.76	68.42	75.36	81.12	86.46	60.74	64.88	98.68	102.24	105.5	108.6	111.5	114.2	117.6	119.5	121.9	124.3	126.6
54 = 137	62.04	71.02	78.17	84 26	89.48	94.20	68.49	102.4	106.1	106.5	112.7	115.8	118.7	121.4	124.1	126.6	129.0	131.4
55 = 146	64.36	73.08	81.09	87.35	92.30	97.73	102.3	106.2	110.6	113.61	116.9	120.1	123.1	126.0	128.7	131.3	133.8	136.3
56 = 142	66.72	76.38	84.07	90.55	96.23	101.30	105.9	116.1	114.1	117.8	121.2	124.5	127.6	130.6	133.4	136.2	138.8	141.3
57 = 145	69.13	79.13	87.16	63.80	100.49	104.9	109.7	114.1	118.2	122.0	125.6	129.0	132.2	135.3	138.2	141.0	143.8	146.4
58 = 147	71.58	81.93	60.18	67.14	103.2	108.6	113.6	118.2	122.4	126.3	126.6	133.4	136.7	136.6	143.1	145.9	148.7	151.4
59 = 150	74.06	84.78	63 32	100.48	106.6	112.4	117.6	122.2	126.6	130.7	134.6	138.2	141.6	144.6	148.1	151.1	154.6	156.8
60 = 152	76.60	87.68	96.50	103.6	110.4	116.3	121.6	126.4	131.0	135.2	136.2	142.9	146.5	149.6	153.2	156.3	159.3	162.2
61 = 155	76.17	90.63	99.75	167.4	114.2	120.2	125.6	136.7	135.4	139.7	143.6	147.6	151.6	155.1	158.3	161.7	164.8	167.8
62 = 157	81.76	93.62	163.04	111.00	117.96	124.18	129.81	135.63	139.86	144.37	148.7	152.8	156.7	160.3	163.6	167.1	170.3	173.4
63 = 166	84.45	96.67	106.40	114.62	121.86	128.22	134.05	139.42	144.40	149.06	153.4	157.6	161.5	165.2	168.9	172.3	175.6	178.8
64 = 163	87.15	66.84	110.0	118.3	125.7	132.3	138.3	143.6	146.0	153.82	158.4	162.6	166.7	170.6	174.3	177.8	181.3	184.6
65 = 165	89.60	102.60	113.2	122.0	129.6	136.5	142.7	148.40	153.7	158.66	163.3	167.8	172.0	175.9	179.8	183.4	187.0	190.4
66 = 168	62.68	106.1	116.8	125.8	133.6	140.7	147.3	153.0	158.5	163.60	168.4	173.6	177.3	181.4	185.4	189.1	162.8	196.2
67 = 170	65.51	109.3	120.3	129.7	137.6	145.0	151.5	157.7	163.3	168.6	173.6	178.2	182.7	187.6	161.0	195.0	198.7	202.3
68 = 173	98.4	112.6	123.9	133.6	141.8	149.4	156.2	162.4	168.2	173.6	178.8	183.6	188.2	192.6	196.8	200.8	204.6	268.3
69 = 175	101.3	115.9	127.6	137.5	146.0	153.4	160.6	167.2	173.2	178.8	184.0	189.6	193.8	198.3	202.6	206.7	210.7	214.5
70 = 178	104.26	116.3	131.3	141.5	150.4	158.3	165.5	172.1	178.2	184.6	189.4	194.6	199.4	204.0	208.5	212.8	216.8	226.8
71 = 180	107.2	122.8	135.1	145.6	154.8	163.2	166.4	177.0	183.4	189.3	194.6	200.2	205.2	210.0	214.5	218.9	223.1	227.2
72 = 183	110.3	126.2	139.6	149.7	159.1	167.4	175.1	182.1	188.6	194.7	200.4	205.8	211.6	215.6	220.6	225.1	229.4	233.6

du cylindre en pouces anglais et en centimètres.	$1^p = 3^{dm}.05$	$1^p.5 = 4^{dm}.57$	$2^p = 6^{dm}.10$	$2^p.5 = 7^{dm}.62$	$3^p = 9^{dm}.14$	$3^p.5 = 10^{dm}.7$	$4^p = 12^{dm}.2$	$4^p.5 = 13^{dm}.7$	$5^p = 15^{dm}.2$	$5^p.5 = 16^{dm}.8$	$6^p = 18^{dm}.3$	$6^p.5 = 19^{dm}.8$	$7^p = 21^{dm}.3$	$7^p.5 = 22^{dm}.9$	$8^p = 24^{dm}.4$	$8^p.5 — 25^{dm}.9$	$9^p = 27^{dm}.4$	$9^p.5 = 29^{dm}.0$
p. cm.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.	chev.
73 = 185	113.4	129.8	142.8	153.9	163.2	171.8	179.8	187.2	193.3	260.1	206.0	211.6	217.2	221.9	226.8	231.4	235.8	240.1
74 = 188	116.5	133.4	146.8	158.1	167.9	176.7	185.4	192.4	199.2	205.7	211.6	217.3	223.4	227.9	233.0	237.6	242.2	246.6
75 = 196	119.7	137.6	150.8	162.4	172.6	181.7	196.6	197.6	264.6	211.2	217.4	223.3	229.6	234.2	239.4	244.2	248.9	253.4
76 = 193	122.9	140.7	154.8	166.8	178.6	186.6	195.6	262.9	210.1	216.9	223.3	229.4	235.1	246.5	245.8	250.8	255.6	266.2
77 = 196	126.1	144.4	158.9	171.2	182.7	191.5	206.2	267.5	215.8	222.7	229.3	235.4	241.4	246.9	252.3	257.5	262.4	267.2
78 = 198	129.4	148.2	163.1	175.6	186.7	196.5	265.4	212.1	221.4	228.5	235.2	241.6	247.6	253.4	258.9	264.2	269.2	274.2
79 = 201	132.8	152.6	167.3	186.2	191.6	261.6	216.6	218.5	227.1	234.4	241.3	247.8	254.6	260.6	265.6	271.6	276.2	281.3
80 = 203	136.2	155.8	171.6	184.8	196.4	266.7	216.1	224.8	232.8	240.4	247.4	254.1	260.5	266.5	272.3	277.9	283.2	288.4
81 = 206	139.6	159.8	175.9	189.4	201.3	211.9	221.6	230.5	238.7	246.4	253.7	266.5	267.1	273.2	279.2	284.9	296.4	295.7
82 = 208	143.0	163.8	180.2	194.2	206.2	217.3	226.9	237.8	244.6	252.5	266.0	267.6	273.8	286.6	286.1	292.6	297.6	363.0
83 = 211	146.6	167.8	184.6	198.9	211.4	223.1	233.9	242.8	250.6	258.8	266.4	273.6	286.3	286.9	293.1	299.2	364.9	312.1
84 = 213	150.1	171.8	189.1	263.8	216.5	227.9	238.3	247.8	256.7	265.6	272.8	280.2	287.1	293.8	306.2	306.4	312.2	317.9
85 = 216	153.7	176.6	193.7	208.6	221.8	232.8	242.8	253.6	262.9	271.4	279.3	286.9	294.6	366.9	307.4	313.7	319.8	325.6
86 = 218	157.4	186.1	198.2	213.6	227.0	237.8	247.4	258.2	269.1	277.8	286.0	293.7	301.6	368.0	314.7	321.1	327.3	333.3
87 = 221	161.6	184.3	202.9	218.6	232.2	244.5	255.6	265.8	275.4	284.2	292.7	306.5	308.0	315.1	322.1	328.7	334.9	341.0
88 = 223	164.8	188.6	207.6	223.6	237.5	250.2	261.6	272.6	281.7	296.8	299.4	367.5	315.2	322.5	329.5	336.2	342.7	348.9
89 = 226	168.5	192.9	212.3	228.7	243.0	255.9	167.6	278.2	288.2	297.5	306.3	314.6	322.4	328.9	337.0	344.0	356.6	356.9
96 = 229	172.3	197.3	217.1	233.9	248.6	261.7	273.6	284.5	294.7	304.2	313.2	321.6	329.7	337.3	344.7	351.7	358.5	365.0
91 = 231	176.2	261.7	222.6	239.1	254.0	267.2	279.5	296.9	361.3	311.0	320.2	328.8	337.1	344.9	352.4	359.6	366.5	373.2
92 = 234	186.1	206.1	226.9	244.4	259.5	272.8	285.7	297.3	367.9	317.9	327.2	336.1	344.5	352.6	366.2	367.4	374.6	381.4
93 = 236	184.6	116.6	231.8	249.8	265.4	279.4	292.0	363.8	314.6	324.8	334.4	343.4	352.2	360.3	368.0	375.6	382.9	389.8
94 = 239	188.0	215.2	236.8	255.2	276.7	284.1	298.6	316.4	321.5	331.8	341.6	356.8	359.6	368.6	376.0	383.6	391.6	398.2
95 = 241	192.0	219.8	241.9	266.6	276.8	290.9	305.4	317.0	328.4	339.0	848.9	358.4	367.4	375.8	384.6	391.9	399.4	406.7
96 = 244	196.1	224.4	247.0	266.1	282.8	297.7	311.2	323.7	335.3	346.1	356.3	366.0	375.1	383.8	392.2	406.2	407.9	415.3
97 = 247	206.2	229.2	252.2	271.7	289.6	304.6	317.2	336.5	342.3	353.4	363.8	373.6	382.8	391.9	460.4	408.4	416.4	424.6
98 = 249	204.3	233.9	257.4	277.3	295.1	311.5	323.1	337.4	349.4	360.6	371.3	381.4	390.9	406.0	408.7	417.0	425.6	432.8
99 = 251	268.5	238.7	262.7	283.0	360.6	316.6	336.5	344.3	356.6	368.1	379.0	388.8	398.9	468.2	417.0	425.6	433.8	441.6
100 = 254	212.8	243.5	268.0	288.8	306.8	323.6	337.7	351.2	363.8	375.6	386.6	397.0	467.0	416.5	425.5	434.2	442.6	456.6

MACHINES A VAPEUR A DÉTENTE SANS CONDENSATION.

359. *Effet d'une machine à vapeur à détente sans condensation.* L'effet théorique $\mathcal{T}'_m$ produit dans une telle machine, par la vapeur dépensée en une seconde, est, en supposant nulle la pression derrière le piston (348),

$$\mathcal{T}'_m = \mathrm{V}h + \mathrm{V}h \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2{,}3026.$$

h' étant la pression derrière le piston, ce travail devient (347)

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}'_m - \mathrm{V}\frac{z}{z_0}h' = \mathrm{V}h + \mathrm{V}h\log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2.3026 - \mathrm{V}\frac{z}{z_0}h'$$

ou

$$\mathcal{T}_m = \mathrm{V}h\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2.3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_0}\right).$$

V volume de vapeur non détendue, dépensé par seconde ;

$\mathrm{V}\frac{z}{z_0}$ volume engendré par le piston en une seconde ;

$\mathrm{V}\frac{z}{z_0}h'$ travail absorbé par h' en une seconde.

$h' = 10^{\mathrm{m}},333$ théoriquement ; mais en pratique, à cause de la résistance de la vapeur dans les tuyaux d'échappement et de la vitesse avec laquelle elle se dégage, h' augmente de 1/12 à 1/10 d'atmosphère quand la vitesse du piston s'écarte peu d'un mètre par seconde et que le diamètre du tuyau d'échappement varie de 1/7 à 1/8 de celui du piston.

Pour avoir le travail pratique $\mathcal{T}_m$ dont on peut disposer sur l'arbre du volant, il faut encore affecter la valeur de $\mathcal{T}'_m$ d'un coefficient k qui dépend des différentes résistances passives de la machine ; ainsi on a

$$\mathcal{T}_m = \mathrm{V}hk\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2.3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_0}\right). \quad (a)$$

TABLEAU des valeurs moyennes du coefficient k.

FORCE DE LA MACHINE.	VALEUR DE k.
De 4 à 8 chevaux.	0.45
De 10 à 20 *id.*	0.58
De 30 à 50 *id.*	0.70
De 60 à 100 *id.*	0.81

360. *Calcul des dimensions d'une machine à vapeur à détente sans condensation.*

Force de la machine, 12 chevaux;

Pression absolue de la vapeur dans le cylindre avant la détente, 5 atmosphères.

Détente au 1/3 (348).

On a

$$k = 0,38, \; h = 10,333 \times 5 = 51^{m},67,$$

et

$$h' = 10,333 + \frac{10,333}{10} = 11,367, \; \frac{z}{z_0} = 3 \; \text{ et } \; \log\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,477.$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (*a*) du numéro précédent, il vient

$$0,075 \times 12 = V \times 51,67 \times 0,38\left(1 + 0,477 \times 2,3026 - \frac{11,367}{51,67} \times 3\right),$$

d'où on tire $V = 0,021$ de mètre cube.

Le volume de vapeur après la détente est alors $0^{m},021 \times 3 = 0^{mc},063$.

Supposant la vitesse du piston égale à $0^{m},90$ par seconde, on a, en représentant par d le diamètre du piston,

$$\frac{\pi d^2}{4} \times 0^{m},90 = 0,063, \quad \text{d'où} \quad d = 0^{m},298.$$

A 5 atmosphères, la densité de la vapeur étant 0,00257363 (266), le poids de vapeur dépensé en une heure est donc $2,57363 \times 0,021 \times 3600 = 194^{k},57$.

On augmente encore cette dépense de 1/10 pour tenir compte des pertes de vapeur qui ont lieu dans les tiroirs, entre les fonds du cylindre et le piston, et par le refroidissement; de sorte que pour une machine de 12 chevaux, la dépense de vapeur est $194,57 + \frac{194,57}{10} = 214$ kilog.; ce qui fait 17,83 kilog. par force de cheval et par heure.

Supposant qu'un kil. de houille produit 6 kil. de vapeur (300), comme cela a lieu quand on chauffe l'eau d'alimentation à 70 ou 80° au moyen de la vapeur qui se dégage, on en brûlera $\frac{214}{6} = 36$ kilog. environ, ce qui fait 3 kil. par force de cheval et par heure. En pratique, pour des forces inférieures à 20 chevaux, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière variant de 4 à 5 atmosphères, et la détente étant au 1/3, il faut compter sur $3^{k},5$ à 4 kil. de houille et quelquefois plus, par force de cheval et par heure; cette consommation est moindre pour des machines plus puissantes.

Chaque mètre carré de la surface de chauffe produisant 20 kilog. de vapeur à l'heure (299), cette surface sera, pour une machine de 12 chevaux, $\frac{214}{20} = 10^{mc},7$, ce qui fait $\frac{10,7}{12} = 0^{mc},89$ environ par force de cheval; en pratique, on compte ordinairement sur un mètre carré par force de cheval.

En général, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie de 4 à 5 atmosphères; lorsqu'elle est de 4 atmosphères, la détente est au 1/2, et lorsqu'elle est de 5 atmosphères, la détente est au 1/3. M. Cavé a porté la pression dans la chaudière jusqu'à 7 atmosphères pour des machines de bateau; en Amérique, cette pression varie de 9 à 11 atmosphères et on détend au 1/5.

Il y a des machines à détente fixe et des machines à détente variable.

Les cylindres de ces machines n'ont pas d'enveloppe.

361. *Volant.* Le volant se calcule à l'aide de la formule du n° 352, dans laquelle faisant $k = 32$, le coefficient numérique 4645 prend les valeurs du tableau suivant.

MACHINE	PRESSION.	DÉTENTE AU	k
A balancier à un seul cylindre, la bielle étant égale à 5 fois la manivelle.	5 atmosph.	$\frac{1}{2}$	7080
		$\frac{1}{3}$	8186
		$\frac{1}{4}$	9218
		$\frac{1}{5}$	10231
	6 atmosph.	$\frac{1}{2}$	6975
		$\frac{1}{3}$	7049
		$\frac{1}{4}$	8914
		$\frac{1}{5}$	9695
		$\frac{1}{6}$	10651
Id. bielle infinie.	5 atmosph.	$\frac{1}{3}$	7064
Sans balancier, bielle = 5 man.	6 atmosph.	$\frac{1}{4}$	8598
A cylindre oscil. de M. Cavé, *id.*	6 atmosph.	$\frac{1}{2}$	7292

MACHINES A VAPEUR A DÉTENTE ET CONDENSATION.

362. *Machines à deux cylindres, dites machines de Woolf.* Il y a des machines à détente et condensation qui n'ont qu'un cylindre à vapeur, et d'autres qui en ont deux. Dans ces dernières, qui sont les machines

de Woolf, la vapeur agit simultanément à pleine pression sur le petit piston, et par détente sur le grand piston et derrière le petit. En supposant un vide parfait derrière le grand piston, l'effort théorique exercé par les pistons sur le balancier, à un instant quelconque de leur course, est

$$P = sh + (S - s)\frac{hc}{c + d(S - s)}.$$

P effort théorique exercé par les tiges des pistons sur le balancier en unités de 1000 kilog.;
s surface du petit piston en mètres carrés;
h pression exercée par la vapeur non dilatée, sur le petit piston, en mètres de hauteur d'eau;
S surface du grand piston en mètres carrés;
c capacité du petit cylindre moins le volume du piston, en mètres cubes;
d distance des pistons aux extrémités des cylindres qu'ils viennent de quitter, en mètres;

Le premier terme sh de la valeur de P est la pression transmise par la vapeur non dilatée. Le volume de la vapeur non dilatée étant c, et le volume qu'elle occupe quand les pistons ont parcouru l'espace d étant $c + d(S - s)$, sa force élastique est $\frac{hc}{c + d(S - s)}$ (348), et la pression qu'elle transmet au balancier, $(S - s)\frac{hc}{c + d(S - s)}$.

Supposant, dans la formule précédente, que l'on a $S = 5s$, ce qui revient à une machine à un cylindre dont la détente est au 1/5, on trouve, pour une valeur quelconque de h, que les valeurs relatives de P, au commencement, au milieu et à la fin de la course des pistons, sont respectivement 20, 9,33 et 7,2. Ainsi, du commencement à la fin de la course des pistons, les efforts sur le balancier varient dans le rapport de 20 à 7,2 ou de 2,78 à 1; au lieu que dans une machine à un seul cylindre, détendant au 1/5, ces efforts varient dans le rapport de 5 à 1.

Dans les machines à un cylindre, le changement d'effort de la vapeur sur le balancier étant plus brusque que dans celles à deux cylindres, il a moins d'influence sur la marche du volant, dont le poids n'a pas besoin d'être beaucoup plus fort que pour une machine à deux cylindres de même force; de sorte que, par un petit excès de poids donné au volant, on obtient une marche aussi régulière avec une machine à un cylindre qu'avec une machine à deux, on supprime un cylindre et on simplifie les tiroirs et tout le mécanisme, tout en augmentant l'effet de la vapeur.

365. *Effet d'une machine à vapeur à détente et condensation.* Que la machine soit à un ou à deux cylindres, l'expression du travail moteur dont on peut disposer sur l'arbre du volant est la même que pour les machines à détente sans condensation (359); ainsi on a

$$\mathcal{T}_m = Vhk\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2,3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_0}\right).$$

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'aux n[os] 348 et 359;

$\frac{z}{z_o}$ pour une machine à deux cylindres exprime le rapport de la capacité du grand cylindre à celle du petit.

h', qui est la pression derrière le piston pour une machine à un cylindre, et derrière le grand piston pour une machine à deux cylindres, varie de 1/7 à 1/9 d'atmosphère pour une température de 40° dans le condenseur, une vitesse de piston de 1^m,00 par seconde et une très-grande section pour le tuyau allant du cylindre au condenseur (355).

TABLEAU des valeurs du coefficient k *pour une machine à un cylindre.*

FORCE DE LA MACHINE.	VALEUR DE k.
De 4 à 8 chevaux.	0.41
De 10 à 20 *id.*	0.52
De 30 à 50 *id.*	0.63
De 60 à 100 *id.*	0.74

Pour une machine à deux cylindres, il conviendrait de diminuer les valeurs précédentes de k de leur dixième environ.

Pour les petites machines à deux cylindres, la détente est ordinairement au 1/4, et pour les grandes elle est au 1/5.

Pour les machines à un cylindre il n'y a pas de règle pour fixer la détente; ordinairement elle est au 1/5, et dans les épuisements les machines qui communiquent le mouvement aux pompes sans mouvement de rotation détendent quelquefois au 1/8. Les machines à détente et condensation sont à moyenne ou à haute pression (346); mais les machines à basse pression peuvent aussi être à détente, c'est ce qui a lieu sur beaucoup de bateaux à vapeur.

Dans ces derniers temps, pour des machines très-bien établies et entretenues, on a porté la détente jusqu'à 1/15, et même plus; cela est surtout avantageux quand les machines produisent momentanément un travail très-faible relativement à leur travail normal. Pour ces limites, dans les machines à deux cylindres la détente commence dans le petit cylindre.

364. *Calcul des dimensions d'une machine à détente et condensation à un seul cylindre.*

Force de la machine 40 chevaux, d'où $k = 0{,}63$; $h = 3$ atm. $= 31^m{,}00$ et $h' = 1/8$ d'atm. $= 1^m{,}292$; détente au cinquième, ce qui donne $\frac{z}{z_o} = 5$ et $\log\left(\frac{z}{z_o}\right) = 0{,}69897$.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule

$$T_m = Vhk\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2{,}3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_0}\right), \quad (a)$$

on a

$$0{,}075 \times 40 = V \times 31 \times 0{,}63\left(1 + 0{,}69897 \times 2{,}3026 - \frac{1{,}292}{31} \times 5\right),$$

d'où on tire

$$V = 0^{mc},064.$$

V' étant le volume de vapeur après la détente, c'est-à-dire le volume total engendré par le piston, on a

$$V' = 0^{mc},064 \times 5 = 0^{mc},32.$$

Supposant la vitesse du piston égale à $1^m,30$ par seconde, on a

$$\frac{\pi d^2}{4} \times 1^m,30 = 0^{mc},32;$$

d'où on tire le diamètre du piston $d = 0^m,56$.

Pour une machine à deux cylindres on opérerait de la même manière; seulement, dans l'équation précédente, $\frac{\pi d^2}{4} \times 1^m,30$ serait remplacé par la nouvelle expression du volume de vapeur détendue dépensé par seconde, et dans la formule (*a*) on remplacerait $\frac{z}{z^0}$ par le rapport du volume de la vapeur détendue à celui de la vapeur à pleine pression. Quand la vapeur ne se détend que dans le grand cylindre, ce rapport est celui des capacités des cylindres; si l'admission de la vapeur cesse et que la détente commence dans le petit cylindre aux 2/3 de la course du piston, ce rapport est celui de la capacité du grand cylindre aux 2/3 de la capacité du petit cylindre.

On est assez dans l'usage de placer les axes des cylindres dans le plan de mouvement du balancier, les distances horizontales des axes du petit et du grand cylindre à l'axe de rotation du balancier étant dans le rapport de 3 à 4. Le tableau suivant a été dressé par M. Morin, d'après cette disposition.

FORCE en chevaux.	VITESSE		COURSE		DIAMÈTRES correspondants aux pressions dans la chaudière de						NOMBRE de tours de volant par 1'.
					4.5 atm.		4 atm.		3.5 atm.		
	du grand piston.	du petit piston.	du grand piston.	du petit piston.	grand cylind.	petit cylind.	grand cylind.	petit cylind.	grand cylind.	petit cylind.	
	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	
4	0.00	0.675	0.90	0.675	0.282	0.140	0.268	0.158	0.106	0.174	30.0
6	Id.	Id.	Id.	Id.	0.342	0.177	0.350	0.102	0.358	0.211	Id.
8	1.00	0.750	1.00	0 750	0.371	0.192	0.382	0.200	0.380	0.229	Id.
10	Id.	Id.	Id.	Id.	0.414	0.214	0.423	0.232	0.432	0.254	Id.
12	Id.	Id.	1.10	0.825	0.448	0.232	0.458	0.251	0.460	0.276	27.8
14	Id.	Id.	Id.	Id.	0.480	0.248	0.491	0.260	0.502	0.295	Id.
16	Id.	Id.	1.20	0.90	0.509	0.263	0.520	0.285	0.531	0.313	27.5
18	1.10	0.825	Id.	Id.	0.513	0.265	0.521	0.286	0.535	0.314	Id.
20	Id.	Id.	1.30	0.075	0.534	0.276	0.545	0.290	0.538	0.328	25.4
22	Id.	Id.	Id.	Id.	0.555	0.287	0.567	0.311	0.581	0.342	Id.
24	Id.	Id.	Id.	Id.	0.575	0.297	0.587	0.322	0.601	0.354	Id.
26	1.15	0.865	1.45	1.00	0.580	0.300	0.598	0.325	0.607	0.357	25.8
28	Id.	Id.	Id.	Id.	0.509	0.300	0.611	0.335	0.625	0.368	Id
30	Id.	Id.	1.60	1.20	0.615	0.318	0.630	0.345	0.642	0 378	21.6
36	Id.	Id.	Id.	Id.	0.661	0.342	0.674	0.360	0.688	0.405	Id.
40	1.25	0.938	1.70	1.275	0.658	0.340	0.673	0.368	0.686	0.404	22.1
45	Id.	Id.	Id.	Id.	0.696	0.360	0.711	0.300	0.727	0.428	Id.
50	Id.	Id.	1.80	1.35	0.735	0.380	0.750	0.411	0.760	0.452	20.8
60	Id.	Id.	Id.	Id.	0.805	0.416	0.821	0.450	0.840	0.494	Id.
70	1.30	0.075	2.00	1.50	0.850	0.440	0.870	0.477	0.800	0.524	10.5
80	Id.	Id.	Id.	Id.	0.910	0.470	0.030	0.510	0.053	0.560	Id.
90	Id.	Id.	2.10	1.575	0.068	0.500	0.987	0.541	1.010	0.594	18.6
100	Id.	Id.	Id.	Id.	1.032	0.526	1.040	0.570	1.065	0.626	Id.
110	Id.	Id.	Id.	Id.	1.070	0.552	1.000	0.598	1.113	0.656	Id.
120	Id.	Id.	Id.	Id.	1.115	0.577	1.140	0.624	1.163	0.685	Id.
130	Id.	Id.	Id.	Id.	1.160	0.600	1.185	0.650	1.210	0.713	Id.

Dans l'application précédente, le volume de vapeur, à la pression *h*, dépensé par heure est

$$0^{mc},064 \times 3600 = 230,40 \text{ mètres cubes.}$$

La densité de la vapeur à 3 atmosphères étant 0,00161453 (266), le poids de vapeur dépensé par heure est

$$1,61453 \times 230,40 = 372 \text{ kilog.}$$

Augmentant cette dépense de 1/8 pour compenser les pertes et le refroidissement, elle devient 418 kilog. Pour des petites machines la fraction 1/8 serait un peu faible.

Un kilogramme de houille produisant 6 kilog. de vapeur, on en brûlera, pour obtenir la force de 40 chevaux, $\frac{418}{6} = 69,7$ kilog., c'est-à-dire $1^k,74$ par force de cheval et par heure. En pratique il faut compter

sur $2^k,5$ à 3 kilog. pour les machines à un cylindre en bonne marche, et sur $3^k,0$ à $3^k,5$ pour les machines à deux cylindres. En soignant très-bien les machines, ces consommations peuvent encore diminuer sensiblement. Dans le Cornouailles, on est arrivé, pour des machines d'épuisement communiquant le mouvement aux pompes sans arbre de rotation, à ne brûler qu'un kilog. de houille par force de cheval et par heure (page 220).

En supposant que chaque mètre carré de surface de chauffe produise seulement 20 kilog. de vapeur à l'heure, pour la force de 40 chevaux, cette surface sera de $\frac{418}{20} = 20^{mc},90$; ce qui fait $0^{mc},52$ par force de cheval. Il ne convient guère, en pratique, de prendre moins de $0^{m},80$ de surface de chauffe par force de cheval, surtout pour les machines faibles.

Le volume du condenseur est le même que pour les machines sans détente (356), c'est-à-dire le 1/8 de celui du cylindre à vapeur. Le volume de la pompe à air est aussi égal à celui du condenseur. L'expérience prouve que la pompe à eau froide doit élever 600 litres d'eau par force de cheval et par heure.

365. *Volant.* Admettant le coefficient de régularité $k = 32$ de Watt, le poids du volant des machines à détente et condensation se calcule à l'aide de la formule du n° 352, dans laquelle le coefficient numérique 4645 prendra les valeurs du tableau suivant.

DÉSIGNATION DES MACHINES.		PRESSION en atm.	DÉTENTE.	COEFFICIENT.
A un seul cylindre et à balancier.		5	$\frac{1}{3}$	7204
			$\frac{1}{4}$	7619
			$\frac{1}{5}$	7843
			$\frac{1}{6}$	8104
			$\frac{1}{7}$	8315
			$\frac{1}{8}$	8449
A un seul cylindre sans balancier.		5	$\frac{1}{3}$	6666
A un seul cylindre, sans balancier, bielle égale à 5 fois la manivelle.	Manivelle simple.	5	$\frac{1}{5}$	7619
	Id. double à angle droit.			1819
	Id. triple à angles égaux.			657
A 2 cylindres, à balancier, bielle égale à 5 fois la manivelle.	Détente dans le grand cylindre seulement. .	4.5	$\frac{1}{4.5}$	5538
	Détente commençant aux 2/3 de la course du petit piston.		$\frac{1}{7.5}$	6031
Oscillante de M. Cavé.		5	$\frac{1}{3}$	7442

Le diamètre moyen du volant varie de 3,5 ou 4 fois la course des pistons pour les machines à deux cylindres, et de 4 à 4,5 fois pour les machines à un seul cylindre, à haute pression, avec ou sans détente, sans balancier.

366. *Emploi des vapeurs autres que la vapeur d'eau, comme force motrice.* Connaissant la température d'ébullition d'une substance (264 et 272), sa chaleur spécifique (260), sa chaleur latente de vaporisation (263), et la densité de sa vapeur (44), on peut déterminer la quantité de chaleur absorbée pour former un volume de vapeur, et par suite connaître, sous le rapport du combustible brûlé, l'avantage qu'offrirait l'emploi de sa vapeur comme force motrice (347).

***TABLEAU** de quelques substances dont les vapeurs sont susceptibles d'être employées comme force motrice.*

DÉSIGNATION des substances.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	DENSITÉ de la substance.	CHALEUR spécifique.	DENSITÉ de la vapeur.	CHALEUR latente.
Eau.	100°0	1.000	1.000	0.624	536.5
Alcool.	78.4	0.792	0.622	1.613	207.0
Éther sulfurique.	37.8	0.7155	0.520	2.586	96.8
Essence de térébenthine.	157.0	0.8697	0.472	5.013	76.8
Huile de naphte.	85.5	0.85	»	2.85	81.0
Sulfure de carbone. . . .	47.0	1.263	»	2.645	»
Ammoniaque.	à 10°,	pression 6.5	atmosph.	0.597	»
Acide carbonique.	à 0°, à −11°,	*id.* 36 *id.* 26	*id.* *id.*	1.524	très-grande.

Jusqu'à présent, on n'a employé avec succès que la vapeur d'eau. Cependant, les essais récents de M. Ericson pour construire des machines à air chaud, et surtout ceux de M. du Tremblay pour établir des machines binaires dans lesquelles la vapeur d'eau, après son effet sur un piston, est utilisée pour vaporiser de l'éther sulfurique dont la vapeur agit sur un second piston, paraissent avoir donné quelques résultats; mais l'expérience n'a encore rien sanctionné d'assez certain pour que nous posions ici quelques chiffres.

367. *Notions sur le prix des machines à vapeur.* A Paris, les machines que l'on construit le plus sont à haute pression, à détente sans condensation; leur prix, pour des forces qui ne dépassent pas 20 chevaux, était, il y a quelques années, de 1000 fr. par cheval, plus 3000 à 4000 fr. par machine; de sorte que n étant la force de la machine en chevaux, son prix était de $1000\,(n+3)$ fr. ou $1000\,(n+4)$ fr.

Dans ce prix se trouvait compris la chaudière, mais non celle de

rechange, et un bout de tuyau de 5 mètres de longueur. Le mécanicien ne fournissait que le monteur pour la pose de la machine; tous les autres frais de montage étaient à la charge du propriétaire.

Au-dessus de la force de 20 chevaux, il n'y avait pas de prix courant.

Il n'y a guère de prix déterminés pour les machines à condensation; elles sont plus chères que les autres, quoique, à force égale de machine, la chaudière soit moins coûteuse.

Le prix des machines à deux cylindres variait, il y a quelques années, de 1800 à 2000 fr. par cheval; aujourd'hui il est compris entre 1200 à 1400 fr. par cheval.

Prix d'achat et de pose d'une machine à vapeur de la force de 20 chevaux, à deux cylindres et à condensation, et de tous ses accessoires.

Achat de la machine et de sa chaudière.	25 000 fr.	
Transport, faux frais et pose.	1 000	
Fourneau et cheminée de 25 mètres de hauteur, en briques.	5 000	
Chambre de la machine. Fondation. Puits. . .	6 000	en moyenne
Achat d'une deuxième chaudière et des accessoires (portes, grilles, armatures...) du fourneau.	4 000	
Construction du fourneau de la deuxième chaudière.	1 500	
Total. . . .	42 500 fr.	

Si la machine était à un cylindre la dépense diminuerait de 2500 fr. environ.

TABLEAU des valeurs actuelles des machines à balancier mises en place, avec leur chaudière et les accessoires, tous frais compris, d'après MM. Bataille et Jullien.

FORCES des machines en chevaux.	MACHINES SANS DÉTENTE sans condensation.	à condensation.	MACHINES A DÉTENTE sans condensation.	à condensation.	PRIX moyens par 1 kilog. de métal.
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
1.20	1540	2000	1760	2000	2.24
2.00	2600	3360	2970	3400	2.09
3.20	3800	4900	4350	4950	1.85
4.70	5390	6950	6150	7000	1.71
6.00	7300	8450	8300	9500	1.62
9.00	9550	12400	10000	12450	1.53
12.00	12200	15800	14000	15850	1.46
15.60	15250	19700	17400	19800	1.42
19.80	18650	24200	21250	24200	1.36
24.80	22500	28600	25700	39300	1.33
30.60	26700	34500	30600	35000	1.30
37.00	31600	40650	36200	41200	1.27
44.80	36700	47500	42000	48000	1.23
54.00	41800	54000	48000	54200	1.20
63.20	49000	63100	56000	64000	1.19
74.60	56000	72000	63500	72500	1.17
87.00	63200	81700	72000	82000	1.14
111.00	79200	102500	90200	103500	1.11
138.50	97500	126500	111000	127000	1.08
170.00	118500	153000	135000	154000	1.06
207.00	142000	184000	162000	185000	1.05
248.00	168000	218000	192000	219000	1.02
295.00	197000	255000	225000	257000	1.00
348.00	230000	298000	263000	300000	0.98
407.00	264000	341000	300000	343000	0.97
473.00	301000	390000	345000	392000	0.96
545.00	340000	440000	390000	445000	0.95

Sur les sommes de ce tableau on compte 1/10 pour les frais d'emballage, de pose et imprévus.

Le prix du kilogramme de métal brut est estimé :

$0^f,55$ pour la fonte, $0^f,60$ pour le fer, $0^f,70$ pour la tôle et $3^f,00$ pour le cuivre.

Pour une machine de 50 chevaux à balancier, le prix du métal façonné sans le 1/10 de frais divers, est respectivement :

$0^f,80$ $3^f,00$ $1^f,00$ $5^f,00$.

Le tableau précédent donne des valeurs que l'on doit considérer comme des minimums souvent trop faibles.

368. *Poids des machines à vapeur.* Des recherches de M. Chabrol ont appris que le poids moyen des machines fabriquées en France, de 1800 à 1825, était de 1460 kilogrammes par force de cheval ; un seul constructeur avait pu le réduire à 1000 kilog. En 1844, dans les meilleures constructions, ce poids s'élevait à 700 ou 800 kilog., non compris une

constante de 1500 à 2000 kilog. qui se reportait sur toute la machine. Pour les locomotives, marchant à leur maximum d'effet, ce poids, y compris le tender, n'excédait pas 500 kilog. par force de cheval développée.

***TABLEAU** des poids des métaux contenus dans les machines à balancier, sans détente ni condensation*, d'après MM. Bataille et Juillen.

FORCES des machines en chevaux.	POIDS DE fonte.	fer.	tôle.	cuivre.	POIDS totaux.
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
1.2	400	40	240	9	689
2.0	755	77	400	16	1248
3.2	1260	132	640	26	2058
4.7	1955	208	940	40	3143
6.6	2825	310	1320	58	4513
9.0	3900	436	1800	80	6216
12.0	5200	595	2400	107	8302
15.6	6710	790	3120	138	10758
19.8	8500	1020	3960	175	13655
24.8	10500	1280	4960	215	16955
30.6	12800	1590	6120	264	20774
37.0	15400	1950	7400	317	25067
44.8	18200	2350	8960	375	29885
54.0	21341	2917	10000	438	34696
63.2	24900	3320	12640	510	41370
74.6	28600	3870	14920	590	47980
87.0	32600	4465	17400	670	55135
111.0	42400	5950	22200	870	71420
138.5	53800	7650	27700	1110	90260
170.0	67000	9650	34000	1370	112020
207.0	82000	12000	41400	1680	137080
248.0	98000	14700	49600	2040	164340
295.0	118000	17600	59000	2420	197020
348.0	139500	21300	69600	2850	233250
407.0	161500	24850	81400	3320	275070
473.0	186000	29200	94600	3820	313620
545.0	214000	33800	109000	4400	361200

***TABLEAU** des proportions des métaux entrant dans la construction des différents genres de machines.*

MACHINES	FONTE.	FER.	TÔLE.	CUIVRE.	TOTAL.
Sans détente ni condensation.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sans détente, à condensation.	1.44	1.12	1.00	1.38	1.29
A détente, sans condensation.	1.22	1.02	1.00	1.07	1.14
A détente et condensation . .	1.46	1.12	1.00	1.38	1.30

A l'aide de ces tableaux on déterminera facilement les poids des dif-

férents métaux qui entrent dans une machine quelconque à balancier, et par suite le prix de la machine (367).

MM. Bataille et Jullien posent ce résultat remarquable, que le poids total des machines, par cheval, est à peu près constant quelle que soit la puissance, et égal à

600 kilog.	pour les machines sans détente ni condensation ;
700	pour les machines à détente sans condensation ;
800	pour les machines à condensation avec ou sans détente.

Pour les machines horizontales ils donnent les poids moyens relatifs suivants :

	fonte.	fer et tôle.	cuivre.
Machines à balancier	1,00	1,00	1,00
Machines horizontales	1,10	0,84	0,82

BATEAUX A VAPEUR.

369. *Force d'impulsion.* La force nécessaire pour faire avancer un bateau dans une eau tranquille d'un espace indéfini est

$$F = k\frac{AV^2}{2g}.$$

F force qui sollicite le bateau dans la direction du mouvement, en grandes unités dynamiques (33) ;

A maître-couple (plus grande section transversale de la partie plongée du bateau), en mètres carrés ;

V vitesse du bateau, en mètres par seconde ;

k coefficient très-variable dépendant de la forme du bateau.

$k = 1.10$ quand le bateau est un prisme rectangulaire droit dont la longueur est égale à cinq ou six fois la largeur.

$k = 1$ quand la proue (avant du bateau) est disposée comme dans le cas précédent, et que la poupe (arrière du bateau) est formée de deux plans verticaux inclinés à 45° avec l'axe du bateau. Dans les applications aux bateaux ordinaires, on peut supposer, sans crainte d'erreur sensible, que la diminution de *k*, due à la poupe, est égale à 1/10 environ de la valeur 1,10 qui convient au prisme.

Si les plans verticaux inclinés sont placés sur la proue du bateau prismatique, au lieu de l'être sur la poupe comme dans le cas précédent, les angles de ces plans avec l'axe du bateau étant successivement :

90°, 78°, 66°, 54°, 42°, 30°, 18°, 6°,

les valeurs respectives de *k* sont :

1,10, 1,05, 0,93, 0,76, 0,60, 0,48, 0,46, 0,44.

En ajoutant une poupe, les valeurs précédentes de *k* diminuent de 1/10 de 1.10, et elles deviennent respectivement :

1,00, 0,94, 0,82, 0,65, 0,49, 0,37, 0,35, 0,33.

Une proue cylindrique à axe vertical réduit la valeur 1,10 de *k* à $1,10 \times \frac{13}{25} = 0,57$.

En ajoutant une poupe on a $k = 0,46$.

Si la proue est formée par les prolongements des faces latérales du prisme, et limitée en dessous par un plan incliné à 43° avec l'horizon, on a $k = 1,10 \times 0,55$

$= 0,605$; quand le plan est incliné à 25°26′ à l'horizon, on a $k = 1,10 \times 0,43 = 0,473$. En ajoutant une poupe on aurait donc respectivement, pour les deux proues précédentes, $k = 0,495$ et $k = 0,363$.

Pour les grands vaisseaux, on est arrivé à réduire k à 0,22 ou 0,24.

Pour les bateaux à vapeur, avec les formes arrondies en tous sens qu'on leur donne, k varie de 0,16 à 0,18; en Amérique on est même arrivé à avoir $k = 0,12$.

Dans des essais plus récents, il paraîtrait que l'on serait parvenu à réduire la valeur de k à 0,05 et même à 0,045.

Les valeurs de k augmentent quand le bateau se meut dans un espace limité, tel qu'un canal.

370. *Travail moteur absorbé par la marche d'un bateau en une seconde.* Ce travail étant représenté par $\mathcal{T}_u$, on a

$$\mathcal{T}_u = \mathrm{FV} = k\frac{\mathrm{AV}^3}{2g}.$$

V espace parcouru par la puissance F en une seconde.
Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'au n° 369.

Cette formule fait voir que pour un temps donné le travail moteur dépensé est proportionnel au cube de la vitesse du bateau; mais l'expérience prouve que ce n'est que pour des vitesses qui ne dépassent pas 4 mètres par seconde; au-dessus de cette limite, des expériences prouvent que le travail croît dans un rapport inférieur à celui du cube de la vitesse, ou que la puissance F croît dans un rapport inférieur à celui du carré de la vitesse.

Pour un espace parcouru E, le travail dépensé par le moteur est

$$\mathcal{T}_u = \mathrm{FE} = k\frac{\mathrm{AV}^2}{2g}\mathrm{E}.$$

Formule qui fait voir que, pour un même espace parcouru, le travail dépensé est proportionnel au carré de la vitesse du bateau.

371. *Impulsion au moyen de roues à palettes.* Représentant par F′ la résistance que l'eau oppose au mouvement des palettes, on a

$$\mathrm{F}' = k'\frac{a\mathrm{V}}{2g}(v - \mathrm{V}).$$

a section des roues à palettes, ou plutôt surface d'une aube, s'il n'y a qu'une roue, et surface de deux aubes, s'il y a deux roues;
V vitesse du bateau;
v vitesse de rotation du centre de gravité des palettes;
$(v - \mathrm{V})$ vitesse avec laquelle les palettes frappent l'eau;
k' coefficient dont la valeur varie de 1 à 1,2, mais qui est ordinairement égal à 1,1.

Quand le mouvement du bateau est arrivé à l'uniformité, la résistance que l'eau oppose au mouvement des roues est égale à celle qu'elle oppose au mouvement du bateau; on a donc (369)

$$\mathrm{F} = \mathrm{F}' \text{ ou } k\frac{\mathrm{AV}^2}{2g} = k'\frac{a\mathrm{V}}{2g}(v - \mathrm{V});$$

d'où l'on tire

$$V = \frac{k'av}{k'a + kA}, \text{ ou } v = \frac{V(k'a + kA)}{k'a}. \qquad (1)$$

Formule qui fait voir que la vitesse V du bateau est proportionnelle à la vitesse de rotation v des palettes, et que si la section a des palettes est très-grande par rapport au maître-couple A, on a $V = v$; mais que dans le cas contraire, comme cela a toujours lieu en pratique, on a $V < v$.

372. *Travail moteur absorbé par seconde pour communiquer la vitesse relative aux palettes.* En représentant ce travail par $\mathcal{T}_p$, comme $v - V$ est l'espace parcouru par la résistance F' en une seconde, on a

$$\mathcal{T}_p = F'(v - V) = k'\frac{aV}{2g}(v - V)(v - V) = k'\frac{aV}{2g}(v - V)^2.$$

373. *Force de la machine d'un bateau recevant son impulsion au moyen de roues à palettes.* Le travail moteur $\mathcal{T}_m$ produit par la machine en une seconde est égal au travail $\mathcal{T}_u$ absorbé par la résistance que le bateau éprouve à avancer (370), et qui est le travail utile, plus le travail $\mathcal{T}_p$ absorbé par la résistance que les roues éprouvent à se mouvoir (372), et qui est le travail perdu; on a donc

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_p = k\frac{AV^3}{2g} + k'\frac{aV}{2g}(v - V)^2,$$

ou, en remplaçant v par sa valeur (1), n° 371, et en transformant,

$$\mathcal{T}_m = \frac{V^3}{2g}kA\left(1 + \frac{kA}{k'a}\right).$$

Cette formule est d'accord avec la pratique et donne exactement la force de la machine pour des vitesses V qui ne dépassent pas 4m,00 par seconde; au-dessus de cette limite, la force de la machine est moindre que celle donnée par la formule.

374. *Rapport du travail utile au travail perdu.* Ce rapport est

$$\frac{\mathcal{T}_u}{\mathcal{T}_p} = \frac{FV}{F'(v - V)} = \frac{V}{(v - V)}. \qquad (370 \text{ et } 372)$$

Expression qui fait voir que ce rapport est d'autant plus grand que $v - V$ est plus petit, c'est-à-dire que la vitesse du bateau diffère moins de celle des palettes, et qu'il serait infini, c'est-à-dire que le travail perdu serait nul, si les palettes ne pénétraient pas dans l'eau; car alors on aurait $v - V = 0$.

Ayant

$$F = F', \text{ ou } k\frac{AV^2}{2g} = k'\frac{aV}{2g}(v - V), \qquad (371)$$

d'où l'on tire

$$\frac{V}{v - V} = \frac{k'a}{kA},$$

on a donc aussi

$$\frac{\mathcal{T}_u}{\mathcal{T}_p} = \frac{k'}{k} \times \frac{a}{A}.$$

Expression qui fait voir que le rapport du travail utile au travail perdu est d'autant plus grand, que la section a des palettes est plus grande par rapport au maître-couple A.

Pour les bateaux voyageant sur mer, le rapport du maître-couple à la section des palettes varie, d'après M. Campaignac, de 4,5 à 7, suivant que la force de la machine varie de 12 à 220 chevaux, et il est moyennement de 6,75 pour les bateaux de 80 à 200 chevaux. Sur les cours d'eau, ce rapport varie ordinairement de 3,5 à 4, et il est encore moindre pour les petits bateaux de rivières.

Sur la haute Seine, le tirant d'eau des bateaux à vide, c'est-à-dire la profondeur à laquelle ils plongent, varie de $0^m,27$ à $0^m,50$; sur la Loire et la Moselle, il est de $0^m,22$ seulement. Pour les bateaux de 40 chevaux environ, le tirant d'eau varie de $0^m,40$ à $0^m,50$.

Supposant $a = 1$, $A = 4$, $k' = 1$ et $k = 0,17$, on a

$$\frac{\mathcal{T}_p}{\mathcal{T}_u} = \frac{4 \times 0,17}{1 \times 1} = 0,68, \quad \text{et} \quad \frac{\mathcal{T}_m}{\mathcal{T}_u} = \frac{1 + 0,68}{1} = 1,68.$$

Ce qui fait voir que le travail utile $\mathcal{T}_u$ étant représenté par 1, le travail perdu $\mathcal{T}_p$ l'est par 0,68, et le travail moteur $\mathcal{T}_m$ par 1,68.

M. Colladon, dans des expériences faites à Genève, a trouvé que le travail perdu était les 0,33 du travail moteur pour un bateau, et les 0,31 pour un autre: c'est un peu moins que ne l'indiquent les rapports précédents.

375. *Calcul de la force d'une machine de bateau.* Supposons que l'on a $V = 3^m,25$, $k = 0,17$, $k' = 1$ et $A = 4a$.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule

$$\mathcal{T}_m = \frac{V^3}{2g} kA \left(1 + \frac{kA}{k'a}\right), \qquad (373)$$

on a

$$\mathcal{T}_m = \frac{34,33 \times 0,17}{19,62} \times A\ (1 + 0,68) = 0,5A.$$

Si on suppose $A = 1^{mc},00$, on aura $\mathcal{T}_m = 0,5$ de grande unité dynamique, ou

$$\mathcal{T}_m = \frac{0,500}{0,075} = 6,67 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Ainsi, chaque mètre carré de section du maître-couple exigera 6,67 chevaux de force; ce qui donne, pour un bateau de petite navigation, de 450 tonneaux et de 24 mètres carrés de maître-couple,

$$\mathcal{T}_m = 6{,}67 \times 24 = 160 \text{ chevaux.}$$

Avant la construction des bateaux de 450 chevaux que fit exécuter le gouvernement français en 1845, on n'avait encore établi en France que des bateaux de 250 chevaux au maximum; en Angleterre, on avait déjà atteint 600 chevaux, et en Amérique 700 à 800 chevaux; depuis, chaque pays a dépassé ces limites respectives.

376. *Travail moteur nécessaire pour faire remonter ou redescendre une rivière par un bateau.* L'expression de ce travail est analogue à celle donnée pour une eau tranquille (373); ainsi on a, quand le bateau remonte,

$$\mathcal{T}_m = \frac{(V+u)^3}{2g} kA \left(1 + \frac{kA}{k'a}\right).$$

u vitesse de l'eau par seconde;
Les autres lettres ont les mêmes significations qu'aux nos 369 et 371;
$(V+u)$ vitesse relative du bateau par rapport à l'eau.

Quand le bateau descend, l'expression de ce travail devient

$$\mathcal{T}_m = \frac{(V-u)^3}{2g} kA \left(1 + \frac{kA}{k'a}\right).$$

$(V-u)$ vitesse relative du bateau par rapport à l'eau.

377. *Bateau sur un canal.* Comme la section d'un canal est assez faible, l'espace occupé par le bateau la diminue sensiblement; ce qui augmente la vitesse relative de l'eau de chaque côté du bateau, et par suite le travail moteur (376). Afin que la vitesse du bateau ne soit pas diminuée par ce surcroît de vitesse relative, on augmente un peu la vitesse des roues à palettes.

378. *Impulsion au moyen des roues à hélices.* Toutes les formules posées dans les nos 369 à 374 sont applicables aux bateaux à hélices; seulement, alors, la vitesse de rotation v est la vitesse de l'hélice dans le sens du mouvement du bateau, c'est-à-dire la vitesse de rotation d'un point quelconque de la roue, multipliée par le rapport entre le pas de l'hélice et la circonférence décrite par ce point. a est la surface de la base du cylindre circonscrit à l'hélice, moins la section de l'arbre; c'est πR^2, en négligeant cette section et en désignant par R le rayon du cylindre.

Les hélices sont complétement noyées, ce qui les rend avantageuses pour les bâtiments de guerre et dans les gros temps; on les place à l'arrière du bateau. Leur diamètre varie de 2 à 4 mètres et elles font de 65 à 150 tours par minute. Le nombre d'ailettes varie de 2 à 6. Leur

surface doit être lisse et leurs angles bien aigus; on les coule en bronze, et toute la roue d'une seule pièce.

L'ARCHIMÈDE, de 80 chevaux, bateau qui servit aux premières expériences sur les propulseurs à hélices, avait les proportions suivantes :

Diamètre du cylindre-enveloppe de l'hélice. . . .	1m,75
Longueur de la spire complète, ou pas.	2m,44
Vitesse moyenne de sillage du navire.	4m,50
Nombre de tours par minute.	138,66
Maître-couple.	12m,50

Pour le NAPOLÉON, l'hélice a 2m,26 de diamètre; elle fait de 120 à 125 tours par minute, et le bateau avance avec une vitesse de 9 à 10 nœuds (4m,50 à 5 mètres par seconde).

Pour la frégate le CHAPTAL, construite dans les chantiers d'Asnières, M. Cavé a adopté les proportions suivantes :

Diamètre de la roue à hélice.	3m,00
Pas.	4m,50
Nombre de pelles.	2
Longueur de *dito* parallèlement à l'axe	1m,00
Nombre de tours par minute.	75
Section immergée du maître-couple.	22mc,00
Force des machines en chevaux.	220

379. *Exemples de grands bâtiments à vapeur.*

LE DIAMANT, voyageant sur l'Hudson, entre New-York et Albany, a 260 pieds anglais (79 mètres) de longueur, ce qui dépasse la longueur d'un vaisseau de ligne. Un vaisseau de 120 n'a que 64 mètres de tête en tête et 57 mètres de quille. Le Diamant est destiné aux voyages de nuit; sa vitesse est de 5 lieues à l'heure.

LE GREAT-WESTERN, deuxième navire à vapeur qui, en 1838, a fait le voyage d'Angleterre en Amérique (de Bristol à New-York), est de la contenance de 1604 tonneaux; sa force est de 450 chevaux pour deux machines; ses quatres chaudières pèsent 180 tonneaux, et elles sont entourées d'une chambre contenant 900 tonnes de charbon, ce qui suffit pour vingt-cinq jours de marche. Tout l'appareil mécanique pèse 470 tonnes. Le tirant d'eau est de 5m,38. La longueur du bateau est de 240 pieds, et la largeur de 58 pieds, y compris les roues, qui ont 38 pieds de diamètre. Le salon, richement décoré par Parris, a 82 pieds de long sur 34 pieds de large; il y a en outre d'autres pièces (chambres, chapelle, salle de conseil); le bateau porte 150 lits réservés aux passagers, et il reste encore un emplacement pour plus de 200 tonneaux de marchandises. La durée du trajet de Bristol à New-York est de 16 jours, et le retour est de 13 jours 1/2; la vitesse moyenne de marche est de 5,25 lieues à l'heure.

LA VICTORIA, plus long de 35 pieds que le plus fort vaisseau de la marine royale, a 275 pieds de la poupe à la proue; sa force est de 500

chevaux ; il est du port de 1865 tonneaux ; il peut recevoir 500 passagers et 1000 tonnes de marchandises; sa construction a coûté 2 millions et demi.

La Reine de l'Est, naviguant entre l'Angleterre et l'Inde, est du tonnage de 2618 tonneaux; son tirant d'eau n'est que de 15 pieds; sa force est de 600 chevaux; sa longueur, de tête en tête, est de 310 pieds et de 282 pieds sur le pont. La longueur de la principale chambre est de 128 pieds. On y trouve seize chambres contenant 400 lits pour les passagers. Tout le reste est en proportion.

La Sophie, naviguant sur le Danube, a 152 pieds de long sur 20 pieds de large; il a été construit à Zurich (383).

380. La consommation en charbon des machines de bateau est très-variable; ainsi elle s'élève à 5 et jusqu'à 10 kilog. de houille par force de cheval et par heure, pour les machines à basse pression sans détente; tandis qu'on a construit des machines à moyenne pression et à détente ne brûlant que 4 kilog. de houille; on est même arrivé à n'en brûler que 2_k,80. D'après M. Campaignac, les forces en chevaux des bateaux étant successivement :

50 80 100 120 140 160 180 200 250 300 350 400 450 500,

le poids en kilogrammes du charbon brûlé par force de cheval et par heure est respectivement, pour des machines à basse pression à condensation détendant aux 7/10 de la course du piston, telles que les construisent MM. Maudslay et Field :

5,000 4,500 4,340 4,185 4,030 3,870 3,710 3,555 3,385 3,280 3,150 2,985 2,820 2,655,

et la surface de chauffe, en mètres carrés et par cheval :

1,200 1,080 1,040 1,000 0,965 0,925 0,890 0,850 0,810 0,785 0,755 0,715 0,675 0,630

381. *Vitesse des bateaux à vapeur et des navires.* En Amérique, des bateaux ont atteint une vitesse de 6^m,65 par seconde; un bateau construit en Angleterre a encore donné une vitesse plus grande; en France on n'a guère dépassé 6 mètres. Aux vitesses qui approchent de ces limites, la force de la machine est considérable pour une très-faible charge; aussi, la marche ordinaire sur un cours d'eau est-elle de 3 à 4 mètres par seconde. On estime qu'en mer, en faisant simultanément usage des voiles et de la vapeur, on peut moyennement accélérer la vitesse due à la vapeur de 0^m,30 environ par seconde.

La vitesse d'un navire par rapport à la surface de la mer se mesure au moyen du *loch*; instrument qui consiste dans un secteur en bois lesté avec du plomb qui le maintient perpendiculaire à la surface des eaux dans lesquelles il plonge ; à cette planche triangulaire est fixée une corde divisée par des nœuds espacés de 15 mètres, et par d'autres espacés de 1^m,50. Le loch jeté à la mer reste en place, et le nombre de

nœuds dont la ligne se déroule sur le bâtiment donne la vitesse, qui s'estime par le nombre des nœuds déroulés dans une demi-minute. Ainsi, dire qu'un navire file 10 nœuds, par exemple, cela signifie que sa vitesse est de $\frac{15 \times 10}{30} = 5$ mètres par seconde.

382. *Poids des machines de bateaux.* Sur rivières, ce poids varie de 1200 à 1400 kilog. par force de cheval, roues à palettes, chaudière et eau qu'elle contient comprises (le combustible n'est pas compris), pour les machines à basse pression sans détente. Pour les machines à haute et à moyenne pression, ce poids n'est que de 800 kilog. (368)

Pour la même force, les machines sont plus légères sur rivières que sur mer.

Poids des différentes parties des machines et chaudières de l'Érèbe (Maudslay) *et du Sphinx* (Fawcett).

DÉTAILS.	ÉRÈBE pour 60 chevaux.	ÉRÈBE pour 1 cheval.	SPHINX pour 160 chevaux.	SPHINX pour 1 cheval.
Organes des machines (cylindres à vapeur, tiroirs, appareils de condensation et d'alimentation, pompes d'épuisement, boulons d'assemblage, tuyaux d'alimentation, d'évacuation et de condensation).	k. 9528.10	k. 158.80	k. 34701	k. 216.88
Charpente des machines (toutes les parties fixes).	4389.00	73.15	21667	135.42
Mécanisme proprement dit (toutes les parties mobiles, non compris les arbres de transmission et leurs manivelles).	3921.50	65.36	13730	85.81
Transmission de mouvement (arbre intermédiaire avec ses manivelles, arbres des roues avec tout ce qu'ils portent, roues à palettes).	5354.10	89.23	28004	175.02
Appareil évaporatoire (valves régulatrices, tuyau d'arrivée de vapeur, corps de chaudières, cheminée, foyers, soupapes, robinets, flotteurs, tuyaux d'évacuation des soupapes d'arrêt, prises d'eau, tuyaux pour remplir et vider les chaudières, pompe à bras, soutes à charbon en tôle).	19318.00	321.97	56828	355.17
Accessoires (parquets, entourage ou garde-corps des machines, garniture pour trous-d'homme, cercle et haubans de cheminée, escalier pour descendre aux machines). .	1225.50	20.42	5747	35.92
Total.	43736.20	728.93	160677	1004.23

Poids total d'appareils à vapeur marins complets, pour divers bâtiments.

NOMS DES BATIMENTS.							
Var.	Liamone.	Érebe.	Marseillais.	Sphinx.	Tancrède.	Eurotas.	Pluton.
NOMS DES CONSTRUCTEURS.							
Fawcett.	Maudslay.	Maudslay.	Fawcett.	Fawcett.	Miller.	Maudslay.	Schneider.
Forces des machines en chevaux.							
50	50	60	80	160	160	160	220
Poids total des machines et chaudières vides.							
48 000k	38 000k	43 500k	72 000k	160 000k	140 000k	128 000k	220 000k
Poids par force de cheval.							
960	760	725	900	1000	875	800	1000

383. *Proportions des bateaux* (379). Sur rivières, la longueur des bateaux doit être aussi grande que possible, afin de diminuer le maître couple; ordinairement elle est égale à onze ou douze fois la largeur. Le rapport de la longueur à la largeur mesurées à la flottaison varie de 3 2/3 à 3 3/4 pour les vaisseaux et frégates à voiles; il est de 6 à 7 pour les galères, et il paraît convenable de faire varier ce rapport entre 5 et 6 pour les bâtiments à vapeur.

La distance des roues à palettes à l'avant du bateau est ordinairement égale aux 2/5 de la longueur totale du bateau; cependant, en Angleterre, dans beaucoup de bateaux, les roues sont placées au milieu de la longueur, et dans quelques bateaux il n'y a qu'une roue placée tout à fait à l'arrière.

On vient de remplacer avec succès les roues à palettes par la roue à hélice, imaginée par M. Sauvage (378).

Il n'y a pas de règle fixe pour déterminer le diamètre des roues à palettes; on le prend le plus grand possible, en le combinant avec la vitesse de la machine, et de manière que le centre des palettes ait la vitesse calculée convenable pour imprimer le mouvement voulu au bateau. En Angleterre et en France, il est ordinairement égal à quatre fois la course du piston; en Amérique, la course du piston est plus grande et le rapport du diamètre des roues à cette course est moindre.

Les palettes sont noyées de $0^{m},06$ à $0^{m},10$ dans l'eau, et leur nombre est

tel, qu'une palette plongeant verticalement, la palette qui la précède sort de l'eau et celle qui lui succède y entre; cependant, afin d'éviter les secousses, le nombre des palettes dépasse celui qu'exigerait cette condition. En mer, l'écartement des palettes, mesuré sur la circonférence extérieure, varie généralement de $0^m,91$ à $1^m,22$.

***TABLEAU** des dimensions des principales parties des bateaux à vapeur de la compagnie des Aigles, construits à la Seyne, près Toulon.* (Machines de MM. Miller et Ravenhill, de Londres).

NOM DU BATEAU.	Aigle-de-la-Mer.	Aigle-du-Rhône.	Aigle-du-Rhône.	Aigle-de-la-Saône.
DESTINATION.	Marseille et Arles.	Arles et Lyon.	Arles et Lyon.	Lyon et Châlons.
FORCE en chevaux pour les deux machines.	80	80	56	40
Longueur totale sur le pont. . . .	$51^m.814$	$60^m.958$	$60^m.958$	$51^m.814$
Largeur de dehors en dehors. . . .	6 .096	6 .096	5 .480	4 .877
Hauteur du pont au-dessus de la plate-forme inférieure du navire.	3 .048	2 .616	2 .235	2 .235
Tirant d'eau. Lége (avec machines et charbon) . . .	0 .610	0 .508	0 .406	0 .450
Tirant d'eau. En charge (avec passagers ou marchandises)	1 .219	0 .660	0 .610	0 .533
Diamètre des cylindres à vapeur. .	0 .940	0 .940	0 .80	0 .711
Course des pistons.	0 .914	0 .914	0 .762	0 .610
Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, en atmosphères . .	1 .333	1 .455	1 .455	1 .455
Nombre de coups de piston par minute, à la vitesse de régime. .	30	30	34	40
Diamètre des roues en dehors des aubes.	$4^m.572$	$4^m.207$	$4^m.115$	$3^m.810$
Longueur des aubes	2 .133	2 .286	2 .057	1 .829
Hauteur ou largeur des aubes. . . .	0 .457	0 .406	0 .381	0 .279
Nombre d'aubes.	14	14	12	12

Bateaux transatlantiques construits aux États-Unis et faisant le service du Havre à New-York.

	Franklin.	Humboldt.
Longueur.	$75^m,00$	$84^m,00$
Largeur.	$12^m,00$	$12^m,00$
Bordée.	$7^m,80$	$8^m,40$
Tonnage.	$1900^t,00$	$2200^t,00$
Puissance des doubles machines à balancier. .	$780^{ch.},00$	$800^{ch.},00$
Diamètre des cylindres à vapeur.	$2^m,80$	$2^m,86$
Course des pistons.	$2^m,40$	$2^m,70$
Diamètre des roues	»	$10^m,80$

384. *TABLEAU des dimensions des principales parties des machines de quelques bâtiments à vapeur.*
(Extrait de l'ouvrage de M. Campaignac).

NOM DU BATIMENT	Érèbe.	Marseillais.	Eurotas.	Sphinx.	Tancrède.	Véloce.	Corresp. d'Alexand.	Trans-atlantique.
DESTINATION DU BATIMENT	Marine impériale.	Marseille à Agde.	Postes impériales	Marine impériale.	Postes impériales	Marine impériale.	Postes impériales	Marine impériale.
NOM DU CONSTRUCTEUR, ou système de construction de l'appareil	Maudsley.	Fewcett.	Maudslay.	Fewcett.	Miller.	Fewcett.	Miller.	Schneider.
Force en chevaux pour les deux machines	60	80	160	160	160	220	220	450
Cylindres à vapeur. — Diamètre des pistons	0m.816	0m.914	1m.221	1m.221	1m.221	1m.231	1m.430	1m.936
Cylindres à vapeur. — Course des pistons	0 .914	1 .067	1 .372	1 .448	1 .372	1 .676	1 .500	2 .280
Cylindres à vapeur. — Chemin parcouru pendant l'introduction de la vapeur	0 .690	0 .774	0 .960	1 .303	0 .995	1 .257	1 .087	2 .052
Pompes à air. — Diamètre des pistons	0 .460	0 .510	0 .710	0 .715	0 .674	0 .813	0 .783	1 .150
Pompes à air. — Course des pistons	0 .457	0 .533	0 .686	0 .724	0 .686	0 .838	0 .750	1 .140
Pompes alimentaires. — Diamètre des pistons	0 .089	0 .088	0 .145	0 .140	0 .133	0 .152	0 .154	0 .200
Pompes alimentaires. — Course des pistons	0 .457	0 .533	0 .686	0 .724	0 .686	0 .838	0 .750	1 .140
Pompes alimentaires. — Eau que peut fournir chaque pompe à la marche normale (en litres), par heure	5453	5284	15848	14705	13343	18248	18444	35608
Pompes alimentaires. — Nombre de coups de pist. par minute à la marche normale	32	27 1/7	23 1/3	22	23 1/3	20	22	16 1/3
Diamètre de l'ouvert. donnant entrée à la vapeur dans l'enveloppe du cylind., ou dans la boîte à soupape d'expansion variable pour les 450	0m.171	»	0m.250	0m.220	0m.268	0m.260	0m.311	0m.380
Course des tiroirs	0 .166	0m.144	0 .280	0 .203	0 .224	0 .250	0 .244	0 .320
Ouverture donnant entrée à la vapeur dans la boîte à tiroirs. — Longueur	0 .275	diamèt.	0 .510	0 .380	0 .455	diamèt.	0 .529	0 .560
Ouverture donnant entrée à la vapeur dans la boîte à tiroirs. — Largeur	0 .100	0m.180	0 .155	0 .125	0 .128	0m.260	0 .149	0 .200
Ouverture donnant entrée à la vapeur dessus et dessous le piston. — Longueur	0 .295	0 .330	0 .470	0 .380	0 .455	0 .510	0 .570	0 .800
Ouverture donnant entrée à la vapeur dessus et dessous le piston. — Largeur	0 .065	0 .071	0 .103	0 .097	0 .0885	0 .120	0 .007	0 .160
Diamètre des soupapes de sûreté (à l'exception du 450 qui a deux soupapes par machine, les autres n'en ont qu'une par machine)	0m.140	0m.130	0m.230	0m.156	0m.156	0m.203	0m.100	0m.200
Diamètre des roues. — A l'extérieur des cercles qui unissent les rayons	3 .700	4 .579	5 .961	6 .093	6 .040	6 .885	6 .600	9 .260
Diamètre des roues. — A l'extérieur des pales	3 .657	4 .410	5 .791	5 .943	5 .844	6 .705	6 .400	9 .000
Diamètre des roues. — A l'intérieur *id.*	2 .857	3 .505	4 .571	4 .623	4 .614	5 .485	5 .000	7 .600
Pales des roues. — Nombre pour chaque roue	10	13	14	16	18	20	18	24
Pales des roues. — Longueur des pales	1m.830	1m.981	2m.438	2m.438	2m.660	2m.743	2m.700	3m.000
Pales des roues. — Largeur *id.*	0 .400	0 .457	0 .610	0 .660	0 .615	0 .610	0 .700	0 .800
Pales des roues. — Surface de chaque pale	0 .732	0 .905	1 .487	1 .600	1 .636	1 .673	1 .890	2 .400

383. *TABLEAU des dimensions des parties principales des machines pour la navigation à vapeur*, de MM. Maudslay et Field, extrait de l'*Artizan-Club* (358).

DÉSIGNATION DES DIVERSES PARTIES.	Puissance nominale en chevaux-vapeur.													
	16	15	20	25	36	40	56	60	76	80	90	100	110	120
Diamètre :	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.
Du cylindre.	56.8	61.0	68.6	74.9	81.3	02.7	102	109	117	122	127	133	141	145
De la tige du piston.	5.1	6.6	7.0	7.0	8.4	8.0	10.2	10.8	11.4	12.1	12.4	12.7	13.3	14.0
De la pompe à air.	30.5	38.1	43.2	44.4	47.0	53.3	58.4	02.1	00.0	70.0	71.1	70.2	80.0	80.4
De la tige de la pompe à air.	3.2	4.4	5.1	5.4	5.7	6.3	7.0	7.4	7.0	8.3	8.6	6.5	10.2	10.8
Du robinet d'injection.	3.2	3.8	4.1	4.4	5.1	5.7	6.3	7.0	7.0	7.0	8.3	8.3	8.6	8.0
De la pompe à eau chaude.	5.7	6.3	7.6	8.4	8.9	10.2	10.8	11.4	12.7	14.0	15.2	16.5	17.8	10.0
Du tuyau d'alimentation.	3.8	4.4	5.1	5.4	5.7	6.3	0.3	7.0	7.0	8.3	8.3	8.0	8.9	10.2
Du tuyau à vapeur.	10.2	12.7	14.6	15.2	16.5	17.8	10.7	21.0	23.5	25.4	20.7	27.0	20.2	30.5
Du tuyau de décharge de l'eau de condensation.	12.7	15.2	17.8	10.0	20.3	22.0	24.1	25.4	20.7	20.2	31.1	33.0	34.3	35.6
De l'axe principal du balancier.	8.9	10.8	12.7	13.3	14.0	15.2	10.5	17.8	10.0	20.3	21.0	22.0	24.1	24.8
Des axes extrêmes du balancier.	5.1	6.0	7.6	7.0	8.3	8.0	16.2	10.8	11.4	11.4	12.7	13.3	13.3	14.6
Des tourillons sur le balancier des bielles de la pompe à air.	3.2	4.1	4.4	4.8	5.1	5.7	6.3	6.3	7.3	7.3	7.6	7.0	7.0	8.3
Du bouton de la manivelle.	6.3	7.0	8.9	0.5	10.2	11.4	12.7	14.6	15.2	10.5	17.8	18.7	19.7	20.3
De l'arbre moteur.	10.8	14.6	15.0	17.1	17.8	10.0	21.0	23.5	25.4	26.0	26.7	20.2	30.5	31.7
Des roues à aubes.	274	335	335	366	300	396	457	518	518	570	570	040	040	701
Des tourillons de l'arbre de commande des tiroirs.	5.1	5.7	6.3	0.3	6.7	5.7	7.0	7.6	7.6	8.3	8.3	8.0	0.5	6.5
Longueur de la course :														
Du piston du cylindre.	61.0	76.2	70.2	83.8	01.4	01.4	107	122	132	142	152	100	168	183
Du piston de la pompe à air.	36.5	38.1	38.1	41.6	45.7	45.7	53.3	01.0	00.0	71.1	76.2	80.0	83.8	01.4
Du piston plongeur de la pompe alimentaire.	15.2	10.0	16.0	20.3	22.6	22.9	26.7	30.5	33.0	35.6	38.1	40.0	41.6	45.7
Traverse de la tige du cylindre.														
Hauteur de la douille d'assemblage.	15.2	19.0	20.3	22.9	24.1	26.7	36.5	33.6	35.6	36.8	38.1	46.6	43.2	44.5
Diamètre *id.*	10.2	11.4	12.7	14.0	15.2	17.1	10.0	20.3	22.2	22.9	24.1	25.4	27.9	30.5
Largeur au milieu de la traverse.	12.7	14.6	15.9	17.8	10.0	21.0	24.1	20.0	20.2	20.0	31.7	33.6	34.3	35.6

Épaisseur de la traverse	3.8	4.1	4.4	5.1	5.7	0.3	7.0	7.6	8.3	8.9	8.9	9.5	10.2	10.5
Traverse de la tige de la pompe à air.														
Hauteur de la douille d'assemblage	11.4	12.7	14.0	16.5	17.1	20.3	22.9	25.4	26.7	27.3	27.9	29.2	30.5	31.7
Diamètre *id.*	7.0	8.6	8.9	10.2	10.5	11.7	13.0	13.3	14.6	15.2	16.5	17.1	18.4	19.0
Largeur au milieu de la traverse	8.9	10.2	11.4	12.7	13.3	15.9	17.8	19.4	20.3	21.0	21.6	22.9	23.5	24.1
Épaisseur de la traverse	2.5	2.9	3.2	3.5	3.8	4.4	5.1	5.4	5.7	5.7	6.0	6.3	7.0	7.0
Colonnes de support.														
Diamètre en haut	10.2	12.1	13.0	14.0	15.2	17.8	20.3	21.0	23.2	23.5	24.1	25.4	26.0	26.7
Diamètre en bas	11.4	14.0	15.9	16.2	17.1	19.7	22.9	23.8	26.7	27.3	27.9	29.2	29.9	30.5
Distance de centre à centre :														
Des bielles latérales de la pompe à air	74.9	87.0	95.0	100	107	121	135	142	154	160	170	174	178	183
Des balanciers (du même cylindre)	83.8	99.0	108	114	122	137	152	160	175	175	183	198	203	211
Des deux flasques du châssis	53.3	58.4	64.8	66.0	68.6	76.2	86.4	86.4	102	102	107	112	114	117
Des cylindres des deux machines	168	183	193	203	213	224	244	254	274	274	284	320	325	330
Lumières à vapeur.														
Largeur	19.0	22.2	25.4	27.9	29.2	33.0	38.1	47.0	47.0	48.3	48.3	50.8	50.8	53.3
Hauteur	3.8	4.4	5.1	5.7	6.3	7.0	7.6	7.6	10.2	10.8	10.8	11.4	12.1	12.1
Soupape à clapet du fond.														
Hauteur	5.1	5.1	6.3	6.3	8.3	9.5	10.2	11.4	12.7	14.0	14.0	15.2	16.5	17.8
Longueur	33.0	35.6	39.4	43.2	45.7	50.8	61.0	66.0	71.1	73.7	73.7	78.7	78.7	81.3
Balancier.														
Largeur au milieu	35.6	45.7	48.3	53.3	58.4	63.5	71.1	73.7	83.8	84.6	88.9	91.4	96.5	99.1
Id. aux extrémités	38.1	15.2	17.1	19.0	20.3	22.2	25.4	26.7	30.5	31.1	32.4	35.6	38.1	39.4
Épaisseur	2.5	2.9	2.9	3.5	3.8	4.4	4.8	5.1	5.7	6.0	6.3	6.3	6.3	6.7

586. *Tableau* des formules donnant les dimensions des parties principales des machines à vapeur pour la navigation, d'après l'*Artizan-Club* (358).

Dans toutes les formules suivantes, les pressions sont exprimées en kilogrammes par centimètre carré, et les dimensions en centimètres.

p excès maxima de pression de la vapeur dans la chaudière sur l'atmosphère.
P pression par centimètre carré de piston.
D diamètre du cylindre.
R rayon de la manivelle ou moitié de la course du piston.
n force de la machine en chevaux.

On suppose un vide parfait derrière le piston, et la pression dans le cylindre égale à celle dans la chaudière; de sorte qu'on a

$$P = p + 1,033 \qquad (266).$$

Pour les machines de mer, les ruptures de pièces étant plus dangereuses et plus difficiles à réparer que pour les machines de terre, on multiplie P par un certain coefficient de sécurité k pour les premières machines, et seulement p pour les secondes; ainsi, dans les formules suivantes, on a

$P = k(p + 1,033)$ pour les machines de mer,
$P = k \times p + 1,033$ pour les machines de terre.

k est compris entre 1,5 et 2, ce dernier chiffre étant un maximum.
(*Int.*, nos 428 et suivants, pour la signification des exposants fractionnaires.)

TOURILLON DE L'ARBRE DES ROUES A PALES.

Diamètre du tourillon. $0,19723\,(R \times P \times D^2)^{\frac{1}{3}}$

Longueur ou portée du tourillon, δ étant son diamètre. . . . . . $\left(1 + \frac{1}{4}\right)\delta$.

MANIVELLES.

Diamètre extérieur et longueur du moyeu d'assemblage avec l'arbre,

d étant le diamètre de cet arbre. $d + \left(\dfrac{D[P \times 3,443 \times R^2 + 0,16433 \times D^2 \times P^2]^{\frac{1}{2}}}{64,97\sqrt{R}}\right)^{\frac{2}{3}}$

Diamètre extérieur de l'œil de la tête, δ étant le diamètre du bouton. . . . . $\delta + 0,0955 \times \sqrt{P} \times D$

Longueur ou portée du même œil. . . . . $0,1421 \times \sqrt{P} \times D$

Épaisseur qu'aurait le corps de la manivelle au centre de l'arbre. . . . . $\left(\dfrac{D^2 \times P \times \sqrt{1,561 \times R^2 + 0,0704 \times D^2 \times P}}{632,7}\right)^{\frac{1}{3}}$

La largeur au même point serait égale au double de l'épaisseur.

Épaisseur du corps de la manivelle au centre du bouton. . . . $0,083 \times \sqrt{P} \times D$

La largeur au même point serait égale à 1,5 fois l'épaisseur.

TRAVERSE DE LA TIGE DU PISTON.

Longueur. . . . . $1,4 \times D$

Diamètre extérieur du renflement ou de la douille d'assemblage, δ étant le diamètre intérieur.	$\delta+0{,}06844\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Hauteur de la douille.	$0{,}237\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre du tourillon.	$0{,}06474\times\sqrt{P}\times D$

La longueur du tourillon est égale aux $\frac{9}{8}$ du diamètre.

Épaisseur de la traverse en son milieu.	$0{,}0593\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Hauteur au même point.	$0{,}2222\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Épaisseur de la traverse près du tourillon	$0{,}046\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Hauteur aux mêmes points.	$0{,}0766\times P^{\frac{1}{2}}\times D$

TIGE DU PISTON.

Diamètre.	$\frac{P^{\frac{1}{2}}\times D}{14}$
Longueur de la partie comprise dans le piston.	$0{,}15\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre maximum de la partie comprise dans la traverse.	$0{,}072\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre minimum de la même partie.	$0{,}068\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre maximum de la partie conique comprise dans le piston.	$0{,}106\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre minimum de la même partie.	$0{,}087\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Largeur de la clavette et des contre-clavettes d'assemblage de la tige avec la traverse.	$0{,}0867\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Épaisseur des mêmes pièces.	$0{,}017\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Largeur de la clavette d'assemblage avec le piston.	$0{,}064\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Épaisseur de la même clavette.	$0{,}026\times P^{\frac{1}{2}}\times D$

BIELLE PRINCIPALE.

Diamètre de la bielle à ses extrémités.	$0{,}072\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre de la bielle en son milieu, *l* étant la longueur de la bielle.	$(1+0{,}0035\times l)\,0{,}072\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre maximum de la partie comprise dans la traverse.	$0{,}074\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Diamètre minimum de la même partie.	$0{,}068\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Largeur de la tête prise dans la chape.	$0{,}1181\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Épaisseur de la même partie.	$0{,}094\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Épaiss. moyenne de la chape au point de serrage de la clavette.	$0{,}03222\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Épaisseur moyenne au-dessus de la clavette.	$0{,}02392\times P^{\frac{1}{2}}\times D$
Distance entre la clavette et l'extrémité de la chape.	$0{,}0366\times P^{\frac{1}{2}}\times D$

Largeur de la clavette et des contre-clavettes au point d'assemblage avec la traverse . . . . . $0,0866 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Largeur des mêmes pièces au point d'assemblage de la tête avec la chape . . . . . $0,083 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Épaisseur commune des clavettes et contre-clavettes de la bielle. $0,02128 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

BIELLES LATÉRALES OU BIELLES PENDANTES POUR LE CYLINDRE A VAPEUR.

(Pour les bielles pendantes de la pompe à air, on se sert des mêmes formules; seulement on remplace D par le diamètre de la pompe à air.)

Diamètre des bielles pendantes de la traverse, aux extrémités. $0,0487 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Diamètre au milieu (l longueur de la bielle). . . $(1+0,0035 \times l)\ 0,0487 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Largeur de la tête prise dans la chape . . . . . $0,0581 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Épaisseur de la même pièce . . . . . $0,046 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Diamètre du tourillon de la traverse qui porte la bielle . . . . $0,06474 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

La longueur de ce tourillon est égale aux $\frac{9}{8}$ du diamètre.

Diamètre du tourillon au bas de la bielle . . . . . $0,053 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Portée du même tourillon . . . . . $0,0573 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Épaisseur moyenne de la chape au point de serrage de la clavette. $0,02426 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Épaisseur moyenne au-dessous de la clavette . . . . . $0,0177 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Largeur de la clavette et des contre-clavettes . . . . . $0,06 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

Épaisseur des mêmes pièces . . . . . $0,0125 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

TOURILLON DE L'AXE PRINCIPAL DU BALANCIER.

Diamètre du tourillon . . . . . $0,1385 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$

La longueur du tourillon est égale à 1,5 fois le diamètre.

LUMIÈRES DE DISTRIBUTION DE LA VAPEUR.

Aire des lumières en centimètres carrés . . . . . $\frac{2,2 \times R \times D^2}{5486,4} + 52$

TUYAUX DE DISTRIBUTION DE LA VAPEUR.

Diamètre de chaque tuyau . . . . . $(0,000326 \times R \times D^2 + 65,8)^{\frac{1}{2}}$

POMPE ALIMENTAIRE.

Capacité en centimètres cubes . . . . . $\frac{R \times D^2}{180}$

SOUPAPES DE SURETÉ.

Diamètre lorsqu'il y a une seule soupape . . . . . $(3,2 \times n + 145,1)^{\frac{1}{2}}$

Idem. deux soupapes . . . . . $(1,59 \times n + 72,56)^{\frac{1}{2}}$

Diamètre lorsqu'il y a trois soupapes	$(1,077 \times n + 48,38)^{\frac{1}{2}}$
Idem. quatre soupapes	$(0,79 \times n + 36,28)^{\frac{1}{2}}$

GRAND LEVIER DE TRANSMISSION DE MOUVEMENT AU BALANCIER.

Portée de l'œil des axes extrêmes du balancier	$0,074 \times D$
Épaisseur du même œil	$0,052 \times D$
Diamètre des axes ou tourillons extrêmes	$0,07 \times D$
Portée des mêmes tourillons	$0,076 \times D$
Diamètre des axes pour la pompe à air	$0,045 \times D$
Portée des mêmes axes	$0,049 \times D$
Hauteur du balancier au centre de rotation, l étant la longueur du balancier supposé en fonte	$(0,06184 \times l \times D^2)^{\frac{1}{3}}$

POMPE A AIR.

Diamètre du corps de pompe	$0,6 \times D$

TRAVERSE DE LA TIGE DE LA POMPE A AIR.

Épaisseur de l'œil d'assemblage avec la tige	$0,25 \times D$
Portée du même œil	$0,171 \times D$
Diamètre des tourillons extrêmes	$0,051 \times D$
Portée des mêmes tourillons	$0,058 \times D$
Épaisseur de la traverse en son milieu	$0,043 \times D$
Hauteur de la traverse au même point	$0,161 \times D$
Épaisseur de la traverse près des tourillons	$0,037 \times D$
Hauteur de la traverse aux mêmes points extrêmes	$0,061 \times D$

TIGE DU PISTON DE LA POMPE A AIR.

Diamètre de la tige	$0,067 \times D$
Largeur de la clavette et des contre-clavettes à la traverse	$0,063 \times D$
Épaisseur des mêmes pièces	$0,013 \times D$
Largeur de la clavette d'assemblage avec le piston	$0,051 \times D$
Épaisseur de la même clavette	$0,021 \times D$

TIGES LATÉRALES OU BIELLES PENDANTES DE LA POMPE A AIR.

Diamètre des bielles aux extrémités	$0,039 \times D$
Largeur de la tête prise dans la chape	$0,040 \times D$
Épaisseur de la même partie	$0,037 \times D$
Épaisseur moyenne de la chape au point de serrage de la clavette	$0,019 \times D$
Idem. au-dessous de la clavette	$0,018 \times D$
Largeur de la clavette et des contre-clavettes	$0,048 \times D$
Épaisseur des mêmes pièces	$0,01 \times D$

TUYAUX DE CONDUITE ET DE DÉCHARGE.

Diamètre du tuyau de trop plein de l'eau de condensation	$3,05 \times (n)^{\frac{1}{2}}$
Aire du passage par le clapet d'aspiration de la pompe à air en centimètres carrés	$11,6 \times n + 51,6$
Aire du tuyau d'injection en centimètres carrés	$0,445 \times n + 18,13$
Diamètre du tuyau d'alimentation	$(0,26 \times n + 19,35)^{\frac{1}{2}}$
Diamètre du tuyau de décharge de la vapeur	$(2,419 \times n + 108,871)^{\frac{1}{2}}$

387. ***TABLEAU** des dimensions des différentes parties des générateurs de quelques bateaux.* A l'exception du *Sphinx*, qui a été construit par M. Fawcett, et du *Transatlantique*, qui sort de l'usine d'Arras, tous les autres sont de MM. Maudslay et Field.

	NOMS DES BATEAUX.										
	St-Pierre.	Liamone.	Rapide.	Africain.	Héva.	Castor.	Sphinx.	Eurotas.	Ténare.	Medéa.	Trans-atlantique.
Force en chevaux.	12	50	80	90	100	120	160	160	180	220	450
Longueur de la chaudière.	2^{m}.74	3^{m}.165	5^{m}.690	»	»	6^{m}.120	6^{m}.400	6^{m}.650	6^{m}.500	7^{m}.130	12^{m}.000
Largeur de la chaudière.	2 .080	4 .06	3 .785	»	»	4 .71	5 .075	5 .040	5 .540	6 .260	7 .50
Hauteur de la chaudière au milieu, non compris le coffre à vapeur.	1^{m}.600	2 .130	2 .100	»	»	2 .760	2 .800	2 .680	2 .750	3 .250	2 .90
Volume total de la chaudière.	8 .91	30 .66	45 .51	51^{m}.15	»	75 .20	106 .66	84 .25	07 .56	131 .70	247 05
Volume d'eau contenu dans la chaudière.	2 .538	7 .534	15 .177	19 .82	»	30 .118	33 .212	32 .868	38 .650	50 .906	80 .911
Volume de vapeur contenu dans la chaudière, y compris les coffres.	2 .140	11 .478	10 .114	12 .17	»	12 .080	28 .162	15 .024	18 .718	47 .768	77 .835
Surface de chauffe totale.	20 .324	63 .166	06 .802	06 .28	83^{m}.00	152 .832	194 .128	147 .064	169 .228	233 .102	419 .412
Id. par cheval.	1 .604	1 .263	1 .210	1 .07	0 .83	1 .274	1 .213	0 .025	0 .040	1 .060	0 .932
Nombre de corps de chaudière indépendants pour la production de la vapeur.	2	2	1	2	»	2	1	2	2	2	4
Nombre de foyers.	2	2	4	4	2	4	6	6	6	6	16
Surface des grilles.	1^{m}.008	2^{m}.702	5^{m}.204	5 .32	8^{m}.00	6^{m}.480	0^{m}.776	7^{m}.488	8^{m}.818	10^{m}.408	22^{m}.040
Diamètre de la cheminée.	0 .46	0 .62	0 .78	0 .86	0 .88	1 .067	1 .217	1 .05	1 .067	1 .18	2 .00
Section des carneaux en mètres carrés.	0 .52	0 .80	0 .55	1 .14	0 .80	1 .38	1 .40	1 .48	1 .02	2 .88	5 .02
Hauteur de la cheminée au-dessus du dôme, non compris le couronnement.	5 .00	9 .15	12 .95	»	»	12 .20	14 .60	11 .20	11 .20	11 .50	11 .00
Hauteur totale de la cheminée.	6 60	11 .28	15 .16	»	»	14 .96	17 .40	13 .88	13 .95	14 .75	13 .90

De ce tableau, il résulte les valeurs limites et moyennes suivantes, par force de cheval, des chaudières à parois planes et à conduits intérieurs.

PARTIES DES CHAUDIÈRES.	FORCES DES APPAREILS.		
	Petites.	Moyennes.	Grandes.
Surfaces des grilles, en mètres carrés.	0.085	0.065	0.045
Surfaces de chauffe, *id.*	1.700	1.300	0.900
Sections totales des carneaux, *id.*	0.044	0.030	0.013
Sections des cheminées, *id.*	0.015	0.011	0.007
Volumes des chaudières, en mètres cubes.	0.750	0.650	0.550
Volumes de l'eau, *id.*	0.220	0.190	0.160
Volumes de la vapeur, *id.*	0.180	0.150	0.120
Volumes des foyers et carneaux, *id.*	0.350	0.310	0.270

EXTRAIT DE L'ORDONNANCE DU 23 MAI 1843 *relative aux bateaux à vapeur qui naviguent sur les fleuves et rivières* (304).

388. *Autorisation de navigation.* Aucun bateau à vapeur ne peut naviguer sur les fleuves et rivières sans un permis de navigation. La demande de ce permis est adressée par le propriétaire du bateau au préfet du département où se trouve le point de départ. Dans cette demande le propriétaire fait connaître :

1° Le nom du bateau ;
2° Ses principales dimensions, son tirant d'eau à vide (374), et sa charge maximum exprimée en tonneaux de 1000 kilogrammes ;
3° La force de l'appareil moteur, exprimée en chevaux-vapeur (35) ;
4° La pression, évaluée en atmosphères et fraction décimale d'atmosphère, sous laquelle l'appareil fonctionnera ;
5° La forme de la chaudière, le service auquel le bateau est destiné, et les points de départ, de stationnement et d'arrivée ;
6° Le nombre maximum des passagers qui pourront être reçus dans le bateau.
Un dessin géométrique de la chaudière est joint à la demande.

La demande de permis est envoyée par le préfet à la commission de surveillance instituée dans le département, et de laquelle les ingénieurs des mines et des ponts et chaussées font partie. Cette commission visite le bateau afin de s'assurer s'il offre toutes les garanties de solidité et s'il n'offre aucun danger d'explosion ou d'incendie. Après cette visite, la commission assiste à un essai du bateau à vapeur, afin de s'assurer si le moteur a une force suffisante pour le service auquel il est destiné. Elle constate la hauteur des eaux lors de l'essai, le tirant d'eau, la vitesse du bateau en montant et en descendant, et les divers degrés de

tension de la vapeur dans la chaudière pendant la marche du bateau. La commission dresse procès-verbal de sa visite et de son essai, en proposant les conditions auxquelles le permis peut être délivré, ou en exposant les motifs pour lesquels elle juge qu'il est convenable de surseoir à la délivrance du permis ou même de le refuser. D'après le procès-verbal de la commission, le préfet refuse ou délivre le permis, qui contient toutes les mesures d'ordre et de sûreté. Ce permis n'est valable que pour un an, et à chaque renouvellement la commission est consultée.

Si le bateau a été muni de son appareil moteur et mis en état de naviguer dans un département autre que celui où il doit entrer en service, le propriétaire doit obtenir du préfet du premier de ces départements une autorisation provisoire de navigation pour faire arriver le bateau au lieu de sa destination. La commission de surveillance est consultée sur la demande. L'autorisation provisoire ne dispense pas le propriétaire du bateau de l'obligation d'obtenir un permis définitif de navigation lorsque ce bateau est arrivé au lieu de sa destination.

389. *Épreuves des chaudières à vapeur. Épaisseur de ces chaudières.* Le fabriquant ne peut livrer aucune machine à vapeur sans qu'elle ait subi les épreuves prescrites ci-après :

Les chaudières à vapeur, leurs tubes bouilleurs et les réservoirs à vapeur, les cylindres en fonte des machines à vapeur et les enveloppes en fonte de ces cylindres ne peuvent être établis à bord des bateaux, sans avoir été préalablement soumis par les ingénieurs des mines, ou, à leur défaut, par les ingénieurs des ponts et chaussées, à une pression triple de la pression effective $n-1$ de la vapeur dans la chaudière (305); cette épreuve s'opère, comme pour les machines fixes, à l'aide d'une pompe de pression (306).

Les chaudières qui ont des faces planes sont dispensées de l'épreuve, mais sous la condition que la force élastique de la vapeur ne s'élèvera pas dans la chaudière à plus d'une atmosphère et demie.

Ces épreuves sont faites à la fabrique, par ordre du préfet, sur la déclaration du fabricant. Elles sont renouvelées après l'installation dans les mêmes circonstances que pour les machines fixes (306), et pendant la marche, si la commission de surveillance le juge à propos, ou si les chaudières ou autres pièces ont subi des changements notables (les propriétaires sont tenus de donner connaissance de ces changements au préfet).

Les machines venant de l'étranger sont pourvues des mêmes appareils de sûreté que les machines d'origine française, et subissent les mêmes épreuves. Ces épreuves sont faites au lieu désigné par le destinataire dans la déclaration qu'il doit faire à l'importation.

L'usage des chaudières et des tubes bouilleurs en fonte est prohibé sur les bateaux.



L'épaisseur des chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé se règle comme pour les chaudières fixes (305).

Les chaudières, tubes bouilleurs, réservoirs à vapeur, et les cylindres en fonte ainsi que leurs enveloppes en fonte doivent, comme pour les machines fixes, porter un timbre apparent indiquant la pression absolue *n* de la vapeur dans la chaudière (305).

390. *Soupapes de sûreté.* Chaque chaudière porte deux soupapes, disposées et chargées comme pour les machines fixes. Leur diamètre et l'épaisseur de leur rebord se règlent également comme au n° 308.

Il est de plus adapté à la partie supérieure des chaudières à faces planes, une soupape atmosphérique, c'est-à-dire une soupape s'ouvrant du dehors au dedans.

Les propriétaires de bateaux à vapeur sont tenus d'adapter aux machines et chaudières employées dans ces bateaux les appareils de sûreté qui pourraient être découverts par la suite, et qui seraient prescrits par des règlements d'administration publique.

391. *Manomètres.* Toute chaudière à vapeur est munie d'un manomètre gradué et disposé comme pour les machines fixes (309).

Le manomètre à air libre n'est exigé que pour des pressions effectives ne dépassant pas 2 atmosphères (au-dessus de cette limite il devient embarrassant de le disposer sur le bateau).

392. *Alimentation des chaudières à vapeur, et indicateurs du niveau de l'eau dans les chaudières.* Chaque chaudière est munie d'une pompe alimentaire bien construite et en bon état d'entretien. Indépendamment de cette pompe, mise en mouvement par la machine motrice du bateau, chaque chaudière est pourvue d'une autre pompe pouvant fonctionner, soit à l'aide d'une machine particulière, soit à bras d'hommes, et destinée à alimenter la chaudière, s'il en est besoin, lorsque la machine motrice du bateau ne fonctionne pas.

Le niveau habituel de l'eau dans la chaudière est le même que pour les chaudières fixes (310), et il est également indiqué à l'extérieur par une ligne apparente.

Il est adapté à chaque chaudière : 1° deux tubes indicateurs en verre, qui sont placés un à chaque côté de la face antérieure de la chaudière ; 2° l'un des deux appareils suivants, savoir : un flotteur d'une mobilité suffisante ; des robinets indicateurs, convenablement placés à des niveaux différents. Les appareils indicateurs sont, dans tous les cas, disposés de manière à être en vue du chauffeur.

Si plusieurs chaudières sont établies dans un bateau, elles ne peuvent être mises en communication que par les parties toujours occupées par la vapeur, et cette communication est disposée de manière que les chaudières puissent, au besoin, être rendues indépendantes les unes des autres. Dans tous les cas, chaque chaudière est alimentée séparément et munie de tous les appareils de sûreté.

393. *Emplacement des appareils moteurs.* Cet emplacement doit être assez grand pour qu'on puisse faire le service des chaudières et visiter toutes les parties des appareils. Cet emplacement est séparé des salles des passagers par des cloisons en planches très-solidement construites, et entièrement revêtues d'une doublure en tôle, à recouvrement, d'un millimètre d'épaisseur au moins.

394. *De l'installation des bateaux à vapeur, des agrès, des apparaux et des équipages.* Le pont est garni de garde-corps d'une hauteur suffisante pour la sûreté des voyageurs; toutes les ouvertures pratiquées au-dessus des machines et des chaudières, qui ne sont pas habituellement fermées par un panneau plein, sont munies d'un grillage en fer ou en bois.

De chaque côté du bateau se trouve placé un escalier d'embarquement (en bois ou en fer), avec une rampe ou une corde à nœuds solidement fixée.

Les tambours qui, de chaque côté du bateau, enveloppent les roues motrices, sont munis d'une défense en fer, descendant assez près de la surface de l'eau pour empêcher les embarcations de s'engager dans les palettes des roues.

Lorsque la cheminée est mobile, et qu'elle ne se trouve pas disposée de manière à être en équilibre sur son axe de rotation dans toutes les positions, il est établi, sur le pont du bateau, un support suffisamment élevé pour arrêter la cheminée en cas de chute, et prévenir tout accident.

La ligne de flottaison indiquant le maximum du chargement est tracée d'une manière apparente sur le pourtour entier de la carène, d'après les points de repère déterminés par le permis de navigation.

Le nom du bateau est inscrit en gros caractères sur chacun de ses côtés.

Dans chaque bateau se trouvent :

1° Deux ancres au moins pouvant être jetées immédiatement ;
2° Un canot à la traîne ou suspendu à des palans, de manière à pouvoir être au besoin mis immédiatement à l'eau. Les dimensions de ce canot sont déterminées par le préfet, d'après l'avis de la commission de surveillance;
3° Une bouée de sauvetage en liége, suspendue sous l'arrière ;
4° Une bache en bon état, à portée du timonnier ;
5° Une cloche pour donner les avertissements nécessaires ;
6° Une boîte fumigatoire pour administrer des secours aux asphyxiés ;
7° Des manomètres de rechange, ainsi que des tubes indicateurs de rechange.

Si le bateau est exposé à être poussé accidentellement à la mer, il est muni des cartes et des instruments nautiques nécessaires à cette navigation.

Indépendamment du capitaine, maître ou timonnier, et des matelots ou mariniers formant l'équipage, il y a à bord de chaque bateau un mécanicien et autant de chauffeurs que l'appareil moteur l'exige.

Nul ne peut être employé en qualité de capitaine ou de mécanicien, s'il ne produit des certificats de capacité délivrés dans les formes déterminées par notre ministre des travaux publics.

395. *Mesures diverses concernant le service des bateaux à vapeur.* Dans toutes les localités où cela est possible, il est assigné à chaque bateau à vapeur, un lieu de stationnement distinct de celui des autres bateaux. En cas de concurrence, les heures de départ sont réglées par le préfet.

Aucun bateau à vapeur ne doit quitter le point de départ et les lieux de stationnement pendant la nuit, ni en temps de brouillard, de glaces ou de débordements, à moins d'une permission spéciale délivrée par l'autorité chargée de la police locale. Tout bateau à vapeur naviguant pendant la nuit tient constamment allumés deux fanaux placés, l'un à l'avant, l'autre à l'arrière. Ces deux fanaux sont à verres blancs lorsque le bateau descend, et à verres rouges lorsqu'il remonte. En cas de brouillard, le capitaine fait tinter continuellement la cloche du bateau pour éviter les abordages.

Si deux bateaux à vapeur, marchant en sens inverse, viennent à se rencontrer, le bateau descendant ralentit son mouvement, et chaque bateau serre le chenal de navigation à sa droite. Si les dimensions de ce chenal sont telles qu'il ne reste pas entre les parties les plus saillantes des bateaux un intervalle libre de 4 mètres au moins, le bateau qui remonte s'arrête et attend, pour reprendre sa route, que celui qui descend ait doublé le passage. Dans les rivières à marée, le bateau qui vient avec le flot est censé descendre.

Si la rencontre a lieu entre deux bateaux à vapeur marchant dans la même direction, celui qui est en avant serre le chenal de navigation à sa droite; celui qui est derrière, le chenal à sa gauche.

Si les dimensions du chenal ne permettent pas le passage de deux bateaux, le bateau qui est en arrière ralentit son mouvement, et attend que la passe soit passée pour reprendre toute sa vitesse. Des arrêtés du préfet désignent les passes où il est interdit aux bateaux à vapeur de se croiser ou de se dépasser.

Les capitaines des bateaux à vapeur peuvent prendre ou déposer en route des voyageurs ou des marchandises, qui sont transportés dans des batelets; mais ils doivent faire arrêter l'appareil moteur du bateau, afin que les batelets puissent accoster sans danger. Ces batelets, avant d'aborder, sont amarrés au bateau à vapeur, et celui-ci ne doit continuer sa navigation que lorsqu'ils ont été poussés au large.

Pour chaque localité, un arrêté du préfet détermine les conditions de solidité et de stabilité des batelets destinés au service d'embarquement et de débarquement des passagers, le nombre des personnes que ces batelets peuvent recevoir, et le nombre des mariniers nécessaires pour les conduire. Le maire de la commune délivre les permis de ser-

vice après s'être préalablement assuré que les batelets sont conformes aux dispositions de sûreté prescrites, et que les mariniers remplissent les conditions exigées par l'art. 47 de la loi du 6 frimaire an VII; c'est-à-dire que ces mariniers doivent être munis de certificats des commissaires civils de la marine dans les lieux où ces sortes d'emplois sont établis, ou de l'attestation de quatre anciens mariniers conducteurs, donnée devant l'administration municipale dans les autres lieux.

Sur les points où le service des batelets serait dangereux, les préfets peuvent en interdire l'usage.

396. *Conduite du feu et des appareils moteurs.* Le mécanicien, sous l'autorité du capitaine, préside à la mise en feu avant le départ; il entretient toutes les parties de l'appareil moteur; il s'assure qu'elles fonctionnent bien et que les chauffeurs sont en état de bien faire leur service. Pendant le voyage, il dirige les chauffeurs et s'occupe constamment de la conduite de la machine.

Il est tenu, à bord de chaque bateau, un registre dont toutes les pages sont cotées et parafées par le maire de la commune où est le siége de l'entreprise, et sur lequel le mécanicien inscrit d'heure en heure :

1° La hauteur du manomètre ;
2° La hauteur de l'eau dans la chaudière, relativement à la ligne d'eau (392);
3° Le lieu où se trouve le bateau.

A la fin de chaque voyage, le mécanicien signe ces indications dont il certifie l'exactitude.

Il est défendu aux propriétaires de bateaux à vapeur et à leurs agents de faire fonctionner les appareils moteurs sous une pression supérieure à celle déterminée dans le permis de navigation, et de rien faire qui puisse détruire ou diminuer l'efficacité des moyens de sûreté dont ces appareils sont pourvus.

397. *Dispositions relatives aux passagers.* Il est défendu de laisser aucun passager s'introduire dans l'emplacement de l'appareil moteur.

Indépendamment du registre du mécanicien (396), il est ouvert dans chaque bateau à vapeur un autre registre dont toutes les pages sont cotées et parafées de la même manière, et sur lequel les passagers ont la faculté de consigner leurs observations, en ce qui pourrait concerner le départ, la marche et la manœuvre du bateau, les avaries ou accidents quelconques, et la conduite de l'équipage : ces observations doivent être signées par les passagers qui les font. Le capitaine peut également consigner sur ce registre les observations qu'il jugerait convenables, ainsi que tous les faits qu'il lui paraîtrait important de faire attester par les passagers.

Dans chaque salle où se tiennent les passagers, il est affiché une copie du permis de navigation et un tableau indiquant :

1° La durée moyenne des voyages, tant en montant qu'en descendant, et en ayant égard à la hauteur des eaux ;
2° La durée des stationnements ;
3° Le nombre maximum des passagers ;
4° La faculté qu'ils ont de consigner les observations sur le registre ouvert à cet effet ;
5° Le tarif des places.

Les propriétaires de bateaux à vapeur sont tenus de recevoir à bord et de transporter gratuitement, les inspecteurs de la navigation, gardes de rivières, ou autres agents qui seraient chargés spécialement de la police et de la surveillance de ces bateaux.

QUATRIÈME PARTIE.

Chemins de fer.

---

398. *Coup d'œil historique.* C'est en 1682 qu'on a construit, aux environs de Newcastle, pour le transport de la houille, les premières lignes de rail-ways, mais les rails étaient en bois; vers 1738 on les fit en fonte, et ce n'est qu'en 1805 que l'on commença à les faire en fer malléable. Les wagons étaient remorqués par des chevaux, et ce n'est guère que depuis l'invention de la machine locomotive, que les chemins de fer ont commencé à croître en importance. C'est à Nicolas-Joseph Cugnot, né à Metz en 1725, que l'on doit les premiers essais tentés pour appliquer au mouvement des voitures la force élastique de la vapeur. Vers 1770, cet ingénieur construisit une petite voiture que faisait mouvoir la seule force de la vapeur.

Depuis à peu près cinquante ans, M. Stephenson construit des machines locomotives; mais elles ne parcouraient que quatre lieues à l'heure. En 1826, M. Séguin imagina la chaudière tubulaire, dont M. Stephenson produisit, en 1828, le tirage par le jet de vapeur. Depuis cette époque, les locomotives exécutées, soit par ce dernier, soit par tous les autres constructeurs, ont marché avec une vitesse de 15, 18 et jusqu'à 25 lieues à l'heure. Depuis 1828, on n'a guère apporté aux locomotives que des perfectionnements de détails, mais qui ont eu cependant une influence bien sensible, soit sur la régularité de la marche, soit sur l'économie du combustible.

Les essais faits jusqu'à ce jour sur les chemins de fer atmosphériques ne permettent pas d'espérer que, sauf quelques cas exceptionnels, ce système remplacera l'ancien, à moins qu'on y apporte de nouveaux perfectionnements.

399. *Division des chemins de fer.* Afin de diminuer le tirage des voitures et d'accélérer la vitesse de transport, on construit des chemins en pierre, en bois et en fer. Ces derniers, qui sont les plus importants, se divisent en chemins de fer de premier et de second ordre. Ceux de

premier ordre sont les chemins de fer permanents que l'on construit aujourd'hui pour les grandes lignes de communication; ils sont destinés au transport, soit des marchandises, soit des voyageurs. Ceux de second ordre, par lesquels a commencé l'usage de ce genre de voies, ne sont que temporaires; on ne les établit guère que dans les usines ou dans les magasins, pour y faciliter le transport des matières premières et des produits fabriqués, ou des marchandises.

400. *Chemin de fer de service ou de second ordre.* Les chemins de fer de second ordre sont simplement formés de deux lignes de barres de fer plates de 4 mètres de longueur, placées de champ, et reposant sur des traverses en bois de $0^m,15$ à $0^m,20$ d'équarrissage. Les barres de fer sont fixées, à l'aide de coins en bois, dans des entailles que portent les traverses; l'écartement de ces traverses est de 1 mètre. Quelquefois les barres de fer sont carrées, et on les fixe sur les traverses en bois au moyen de clous ou de vis à tête noyée. Les barres de fer sont quelquefois posées à plat sur deux lignes de madriers en bois de $0^m,15$ à $0^m,20$ d'équarrissage, sur lesquelles elles sont fixées de distance en distance par des clous ou des vis à tête fraisée. C'est sur ces deux lignes de barres de fer que roulent les roues des wagons. Ces chemins n'offrent jamais une grande solidité, aussi ne les construit-on que pour des communications de peu d'importance.

TABLEAU des dimensions moyennes de quelques rails de chemins de service.

DÉSIGNATION des chemins.	DIMENSION des barres		POIDS d'un chariot chargé.	DISTANCE des traverses.	OBSERVATIONS.
	verticales.	horizontales.			
	m.	m.	k.	m.	
Pont-canal de Digoin.	0.060	0.016	4000	1.00	
Pont-canal de l'Allier.	0.070	0.009	1400	1.00	
Pont de Roanne. . . .	0.070	0.015	1300	1.00	
Leeds et Selby.	0.030	0.030	2500	1.10	
Soccoa.	0.012	0.030	2900	. . .	Rails sur longrines de $0^m.15$ sur $0^m.15$.
Travaux de Cherbourg.	0.030	0 050	6000	. . .	*Idem* de $0^m.20$ sur $0^m.15$.
Canal de Bourgogne. .	0.005	0.040	. . .	. . .	Rails sur longrines.

CHEMINS DE FER DE PREMIER ORDRE.

ÉTABLISSEMENT DE LA VOIE.

401. *Largeur de la voie.* (Les nombres qui suivent, sur l'établissement de la voie, sont en partie extraits de l'ouvrage de MM. Perdonnet et Polonceau, *Portefeuille de l'ingénieur des chemins de fer.*) En France et en Belgique, et généralement en Angleterre, pour le transport des voyageurs, la distance d'axe en axe des deux files de rails est de 1^m,50 ou de 1^m,44 entre les faces intérieures des rails; sur le chemin de Londres à Yarmouth, cette distance intérieure est de 1^m,52; sur le chemin de Dundee à Arbroath et d'Arbroath à Forfar (Écosse), elle est de 1^m,68; sur les chemins d'Irlande et de Russie elle est de 1^m,83; sur le chemin de Londres à Bristol, où tout dépasse les limites ordinaires, M. Brunel fils l'a portée à 2^m,13; la vitesse habituelle de circulation y est de 12 à 15 lieues à l'heure, au lieu de 9 à 12 qu'elle est ordinairement sur les autres chemins. Un chemin économique, construit de Gand à Anvers, n'a que 1^m,10 de largeur de voie; sur ce chemin, une machine locomotive avec son tender ne pèse que 5 tonnes.

402. *Entre-voie.* Sur la plupart des chemins français et belges, l'entre-voie a 1^m,80; sur le chemin de Londres à Birmingham, elle a 1^m,92; sur celui de Bristol, 1^m,87; sur celui de Bruxelles à Mons, 2^m,50. Sur le chemin de Versailles (rive gauche), la distance des caisses de deux diligences placées sur deux voies différentes est de 0^m,84 (il n'y a aucun danger pour le voyageur qui passe la tête à la portière), et la distance des marchepieds est de 0^m,45. Avec cet espacement de voitures, il faut éviter de réduire la largeur 1^m,80 de l'entre-voie, en y plaçant des colonnettes en fonte soutenant des ponts.

403. *Accotements.* Sur les chemins anglais, la largeur des accotements est, pour les terrains ordinaires, de 0^m,50 plus grande sur remblai que dans les tranchées. Dans les terrains marécageux, elle est au contraire plus grande dans les tranchées que sur remblai; ainsi elle est de 3 mètres dans les tranchées et de 1^m,50 à 2 mètres sur remblai. Sur le chemin de Versailles (rive gauche), cette largeur, comptée depuis la face extérieure du rail, est de 1^m,57 en remblai, et de 0^m,87 dans les tranchées; sur le chemin de Bristol, cette largeur, comptée de l'extérieur du rail à la crête du remblai ou à l'arête du fossé, est, en terrain ordinaire, de 1^m,45; sur le chemin de Liverpool à Manchester, elle est de 1^m,52; sur le chemin de Londres à Birmingham, de 2^m,20, et sur les nouveaux chemins belges (Bruxelles à Mons), de 1^m,75. Il convient, d'après M. Perdonnet, pour la sûreté de la circulation, de ne pas lui donner moins de 1^m,50.

Dans les souterrains, et quelquefois dans les ouvrages d'art, on diminue la largeur des accotements afin de réduire la dépense. L'eau s'écoule alors par un fossé ou aqueduc placé au milieu de l'entre-voie.

L'administration des ponts et chaussées prescrit, pour la distance de la face extérieure du rail à l'arête extérieure du chemin, 1 mètre en déblai, en souterrain et sur les ponts, et 1m,50 en remblai.

404. *Fossés, sentiers le long des barrières, talus.* Les dimensions des fossés doivent être en rapport avec la quantité d'eau qu'ils reçoivent et à laquelle ils doivent donner un écoulement facile (cinquième partie).

Il suffit que les sentiers placés le long des barrières aient 1 mètre de largeur entre le remblai et les barrières.

La compagnie doit acheter 2 ou 3 mètres de largeur de terrain au delà des crêtes des tranchées; on y établit des fossés qui empêchent les eaux de descendre sur les talus.

Dans les grandes tranchées, on établit, à une petite hauteur au-dessus du fossé, une petite banquette de 0m,30 de largeur, avec une légère contre-pente pour retenir les petites pierres qui se détachent toujours des talus.

L'administration des ponts et chaussées a fait établir, sur les talus du chemin de fer du Nord, des banquettes de trois en trois mètres; mais elle reconnaît aujourd'hui que ces banquettes, en retenant les eaux, sont plus nuisibles qu'utiles. Elles ne contribueraient réellement à soutenir les parois de la tranchée qu'autant qu'elles seraient accompagnées de fossés sur toute leur longueur, et que les fossés placés à différentes hauteur seraient tous mis en communication par des rigoles.

Il y a des terres qui se soutiennent sous un angle de 45°, mais d'autres qui coulent sous des angles plus faibles (cinquième partie).

405. *Ouverture et hauteur des ponts.* Quand le chemin devra passer au-dessus d'une route impériale ou départementale, ou d'un chemin vicinal (cahier des charges des chemins de fer de Paris à Rouen, de Paris à Orléans et de Bâle à Strasbourg), l'ouverture du pont ne sera pas moins de 8 mètres pour la route impériale, 7 mètres pour la route départementale, 5 mètres pour un chemin vicinal de grande communication, et 4 mètres pour un chemin vicinal ordinaire.

La hauteur sous la clef, à partir de la chaussée de la route, sera de 5 mètres au moins. Pour les ponts en charpente, la hauteur sous poutres sera de 4m,30 au moins. La largeur entre les parapets sera de 7m,40 au moins, et la hauteur de ces parapets de 0m,80 au moins.

Si au contraire le chemin de fer passe au-dessous d'une route impériale, d'une route départementale, d'un chemin vicinal de grande communication ou d'un simple chemin vicinal, la largeur minimum entre les parapets du pont qui supportera ces différentes voies sera respectivement de 8 mètres, 7 mètres, 5 mètres et 4 mètres.

L'ouverture du pont entre les culées sera au moins de 7m,40, et la

hauteur de l'intrados, mesurée verticalement au-dessus des rails extérieurs, ne sera pas moins de 4m,30.

Cette hauteur minima de 4m,30 ne présente aucun inconvénient pour les ponts en maçonnerie dont la voûte est un arc de cercle, avec des flèches de 1/6 à 1/7, comme pour les ponts avec fermes en fonte ou en charpente; mais il n'en est pas ainsi pour les ponts en maçonnerie à plein cintre.

Avec cette hauteur minima, en effet, il n'est pas possible d'ouvrir entièrement les portières de gauche des voitures de voyageurs; les siéges des conducteurs de trains sont réduits à de très-petites dimensions, quoique leur angle extérieur passe à 0m,05 de l'intrados de la voûte, et on est gêné pour l'arrimage des marchandises encombrantes sur les plates-formes des wagons, et pour le transport des voitures de roulage sur trucks.

Ces inconvénients ont déterminé diverses compagnies à porter, comme pour les souterrains, à 4m,60 la hauteur de l'intrados au-dessus des rails extérieurs pour les ponts en maçonnerie à plein cintre, ce qui donne 5m,50 de hauteur au-dessus des rails dans l'axe du pont. Cette augmentation de 0m,30 fait disparaître les inconvénients qui viennent d'être signalés (407).

DIMENSIONS PRINCIPALES DU MATÉRIEL ROULANT DES CHEMINS DE FER DU MIDI, POUR SERVIR A L'ÉTABLISSEMENT DES QUAIS ET OUVRAGES D'ART.

Machines-tender mixtes et machines-tender à voyageurs.

Longueur de dehors en dehors des tampons.	8m,870
Largeur totale aux traverses extrêmes.	2 ,700
Hauteur totale depuis le dessus des rails, cheminée comprise.	4 ,200
Hauteur de la caisse à eau au-dessus du rail.	2 ,870
Hauteur des extrémités inférieures des clefs des bielles motrices et d'accouplement au-dessus du rail.	0 ,315
Hauteur des chasse-pierres au-dessus du rail.	0 ,045
Écartement longitudinal des chasse-pierres.	7 ,745
Écartement d'axe en axe des essieux extrêmes.	4 ,700
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons.	9 ,030
Idem des chasse-pierres.	7 ,900
Calage intérieur des roues d'avant et d'arrière	1 ,360
Idem. du milieu.	1 ,365

Machine avec son tender.

Longueur totale d'une machine et de son tender accouplés (chemin de fer du Nord).	13 ,600

Voitures et wagons.

Hauteur de l'axe des tampont au-dessus du rail	non chargé.	1 ,030
	chargé.	0 ,980
Calage intérieur des roues.		1 ,362

Voitures de 1re classe, 2e classe et wagons à bagages.

Longueur du dehors en dehors des tampons	7m,220
Hauteur du dessous du 1er marchepied au-dessus du rail (voiture chargée)	0 ,490
Largeur de dehors en dehors des marchepieds	3 ,100
Largeur de dehors en dehors des tampons	2 ,100
Hauteur de la guérite au-dessus du rail (La guérite est placée sur le côté) — minima	3 ,450
— maxima	3 ,530
Écartement d'axe en axe des essieux	3 ,600
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons	7 ,422

Voitures de 3e classe et voitures mixtes.

Longueur de dehors en dehors des tampons	8 ,120
Hauteur du dessous du 1er marchepied au-dessus du rail (voiture chargée)	0 ,490
Largeur de dehors en dehors des marchepieds	3 ,100
Largeur de dehors en dehors des tampons	2 ,100
Hauteur de la guérite de 3e classe au-dessus du rail (La guérite est placée sur le côté) — minima	3 ,450
— maxima	3 ,530
Écartement d'axe en axe des essieux	4 ,000
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons	8 ,300

Wagons à marchandises et à bestiaux.

Longueur de dehors en dehors des tampons	7 ,460
Largeur de dehors en dehors des tampons	2 ,100
Largeur maxima de la caisse avec les deux portes	2 ,840
Hauteur du rail au tablier (voiture chargée)	1 ,165
Hauteur de la guérite au-dessus du rail (La guérite est placée au milieu de la caisse) — minima	3 ,775
— maxima	3 ,805
Écartement d'axe en axe des essieux	3 ,200
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons	7 ,656

Wagons-écuries.

Longueur du dehors en dehors des tampons	5 ,560
Largeur du dehors en dehors des tampons	2 ,100
Hauteur de la lanterne au-dessus du rail (La lanterne est placée au milieu de la caisse) — minima	3 ,800
— maxima	3 ,810
Écartement d'axe en axe des essieux	2 ,600
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons	5 ,820

Wagons plates-formes.

Longueur du dehors en dehors des tampons	7 ,460
Largeur du dehors en dehors des tampons	2 ,100
Largeur maxima du wagon	3 ,100
Hauteur du rail au tablier (voiture chargée)	1 ,095
Écartement d'axe en axe des essieux	3 ,200
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons	7 ,656

Wagons à bois.

Longueur de dehors en dehors des tampons	5 ,560
Largeur de dehors en dehors des tampons	2 ,007
Largeur maxima de la caisse	2 ,600
Hauteur du rail au tablier (voiture chargée)	1 ,095
Écartement d'axe en axe des essieux	2 ,600
Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons	5 ,820

406. *Pentes des routes aux abords des ponts.* S'il y a lieu de déplacer les routes existantes, la déclivité des pentes ou rampes ne pourra excéder 0m,03 pour les routes impériales et départementales, et 0m,05 pour les chemins vicinaux.

407. *Souterrains.* La largeur entre les pieds-droits (cah. des charges cité n° 405) est fixée à 7m,40 et la hauteur sous la clef à 5m,50.

Il convient qu'un homme puisse se tenir debout sur l'impériale : or, les diligences les plus élevées ayant 2m,80, si on compte 2m,20 pour l'homme de grande taille avec son chapeau, on voit que la distance des rails à l'intrados ou aux sous-poutres doit être de 5 mètres au moins.

408. *Superficies occupées par les gares et ateliers.* La surface occupée par une gare destinée seulement aux voyageurs, placée à l'extrémité d'une seule ligne, varie de 0,4 à 1,5 hectare; ce dernier nombre paraît suffisant pour les plus actives circulations. Quant aux gares de marchandises, M. Perdonnet pense qu'une superficie de 2 hectares suffirait pour la plupart des chemins.

Au chemin de fer du Nord, pour une exploitation de 584 kilom. et un trafic considérable, la surface des 3 ateliers réunis (La Chapelle, Amiens et Lille), non compris les dépôts de machines, où l'on fait une partie de l'entretien, se divise comme l'indique le tableau suivant. Pour les chemins d'Orléans et du Centre, les ateliers sont à Ivry et à Orléans.

	Nord.	Orl. et Centre.
Ateliers des machines et tenders. . . .	12 970m.q.	8 894m.q.
Id. des voitures.	13 095	3 673
Bureaux.	645	364
Magasins.	5 206	712
Cours.	43 120	8 607
Totaux.	75 036	22 250

Adjudication des travaux à exécuter pour la construction de la gare dans Paris du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

DÉSIGNATION.	ÉVALUATION.	RABAIS p. 100.	ADJUDICATAIRE.
	f.	f.	
Terrasse et maçonnerie.	1 218 248.91	4.05	M. Teigneux.
Pavage.	111 654.13	12.00	M. Chanudet.
Charpente.	203 854.49	9.00	M. Turgard.
Serrurerie.	143 195.81	29.15	M. Jacquemart.
Menuiserie.	175 845.42	19.15	M. Menetereau.
Couverture et plomberie.	185 348.19	32.12	M. Cheret.
Peinture et vitrerie. . .	83 274.00	31.00	MM. Coursier et Journeau.

409. *Chaussée sur déblai.* Sur un terrain solide, on fait immédiatement la fouille jusqu'à la profondeur de 0m,50 ou 0m,60 au-dessous du

niveau des rails, en inclinant le fond de 0m,03 par mètre à partir de l'axe vers l'un ou l'autre côté. On construit ensuite, parallèlement à l'axe, deux murs en pierre sèche qui séparent la chaussée du fossé: on donne à ces murs une hauteur égale à celle de la chaussée et un fruit de 1/10 du côté du fossé. Sur le fond de l'espace intercepté par ces murs, on étale une couche de 0m,25 d'épaisseur de sable, de pierres concassées, de menu charbon ou de toute autre matière perméable et légèrement élastique; sur cette couche, on place les dés ou les traverses qui doivent supporter les coussinets. Les coussinets posés, on y ajuste les rails, que l'on fixe par des coins de bois, et on remplit l'intervalle entre les dés ou les traverses, jusqu'au niveau de la face supérieure des murs en pierre sèche, avec la matière employée pour le fond de la chaussée. Il importe que les dés, et surtout les traverses, soient bien enveloppés de cette matière, laquelle, étant bien pilonnée tout autour, les empêche jusqu'à un certain point de se déranger, et contribue puissamment à leur conservation.

Dans les tranchées, on peut employer les dés ou les traverses; mais on préfère ces dernières, qui sont plus élastiques, maintiennent bien parallèles les deux lignes de rails et sont plus faciles à relever. Il n'y a que le prix qui, dans certaines localités, peut faire employer les dés (418).

410. *Chaussée sur remblai.* Si le terrain est solide, la chaussée se construit comme dans le numéro précédent, sauf la plus grande largeur des accotements (403). Il n'est pas nécessaire de bomber la surface qui supporte la matière perméable et élastique, l'inégalité de tassement du remblai la bombe naturellement.

Les dés sont prohibés sur remblai, on n'y emploie exclusivement que les traverses en bois (418).

411. *Chaussée sur un terrain marécageux.* Après avoir desséché le terrain, si cela est possible économiquement, on retombe dans les cas précédents.

Si le terrain marécageux a peu de profondeur, et qu'on ne veuille ou qu'on ne puisse pas le dessécher, on enfonce des pilots qui pénètrent jusqu'à une profondeur convenable dans le terrain solide (125 et suivants); on réunit la tête de ces pieux par des longrines sur lesquelles on pose des traversines, et sur ces traversines on place de nouveaux cours de longrines qui portent les rails.

Si le marais est très-profond, on dessèche, au moyen de fossés parallèles, une couche de 0m,40 à 0m,50 d'épaisseur. Sur cette bande de terrain, on repose des fascines que l'on recouvre d'un lit de pierrailles. On place ensuite, comme dans le cas précédent, des cours de longrines, des traversines et les longrines qui supportent les rails.

Au chemin de fer de Versailles (rive gauche), pour fonder sur un terrain sablonneux aquifère d'une profondeur considérable, on a enfoncé le long de chacun des talus deux cours de palles-planches éloignés de

1 mètre; on a vidé les terres entre ces palles-planches, et on les a remplacées par des murs en pierres sèches. On a ensuite enlevé la couche de terrain ainsi desséchée entre les deux fossés, et sur le fond de cette nouvelle excavation on a posé avec soin un lit de grosses pierres; sur ce premier lit on en a étendu quelquefois un second et même un troisième en pierres moins grosses, et sur ces pierres on a établi la chaussée en sable de 0m,50 d'épaisseur (409).

412. *Sable et pierres concassées.* Le sable doit être composé de grains de grosseur moyenne et assez durs pour ne pas être facilement écrasés.

Il en faut au moins 4 mètres cubes par mètre courant de chaussée, sans compter ce que l'on consomme dans les premiers temps pour relever la voie.

Le prix du sable est très-variable; il dépend surtout de la distance de la carrière au point où il est employé. A la carrière il coûte ordinairement de 0 fr. 50 c. à 0 fr. 75 c. le mètre cube; au lieu que rendu sur le chemin de fer, il a coûté 2 fr. au chemin de Saint-Germain; au chemin de fer de Versailles (rive gauche), sans que la distance de transport soit très-considérable, il a coûté 4 fr., 4 fr. 50 c. et jusqu'à 6 et 7 fr. le mètre cube; au chemin de fer de Lille à la frontière belge, il a coûté jusqu'à 12 fr., et en moyenne 8 fr. 40 c.

Les pierres concassées employées à la construction de la chaussée doivent être d'égale dureté et pouvoir, comme le sable, résister à l'écrasement. Il faut rejeter celles que la gelée réduirait en poussière.

Chemin de fer de Paris à Chartres. **Fourniture du ballast destiné à la pose des voies (1847).**

1er *lot.* De Rambouillet au hameau du Pâty, 13000 mètres, évalués, y compris une somme à valoir de 7000 fr.	141 140 fr.
2e *lot.* Du Pâty au chemin de Gallardon, 10700 mètres, y compris 6000 fr. à valoir.	130 700
3e *lot.* Du chemin de Gallardon au ruisseau d'Oisième, 7500 mètres, y compris 5000 fr. à valoir.	108 410

Les cautionnements respectifs pour ces lots sont 4500, 4200 et 3500 fr.

Les lots ont été adjugés, le 1er, à M. Ferret, de Nogent-sur-Seine; le 2e, à M. Moulin, d'Amiens, et le 3e, à M. Cagnard, d'Amiens, avec les rabais respectifs de 13f,65, 5f,25 et 5f,25 pour 100.

413. *Dés.* Les dés peuvent être d'une pierre quelconque, mais ni trop tendre ni trop gélive. Sur les chemins anglais, ils n'ont pas moins de 0m,60 de côté sur 0m,30 de hauteur. A l'exception de la face supérieure, que l'on dresse légèrement pour recevoir le coussinet, les autres faces sont brutes ou à peu près. Une plaquette de carton goudronné ou de bois interposée entre le dé et le patin du coussinet donne de l'élasticité au chemin.

414. *Traverses* (d'après le cahier des charges du chemin de fer de Strasbourg). Les traverses à fournir seront en bois de chêne neuf, sans pourriture, nœuds vicieux, gélivure, roulure ni piqûre; de l'espèce la plus dure et la plus dense, et abattu en bonne saison, c'est-à-dire du 15 octobre au 15 mars. Ces traverses n'auront pas plus de deux ans d'abatage.

Les traverses seront équarries ou demi-rondes.

Les traverses équarries auront les quatre faces dressées à la scie ou à la cognée, sans sujétion de vive arête sur l'une des faces seulement, et sans que la flache ait plus de 4 centimètres.

Les traverses demi-rondes seront débitées dans les bois fendus en deux à la scie, par conséquent leur épaisseur sera moitié de leur largeur; elles seront complétement dépourvues d'écorce.

Le nombre des traverses de joint sera à celui des traverses intermédiaires dans le rapport de 1 à 3.

Voir le tableau suivant pour les dimensions des traverses.

Sur ces dimensions, et sur un quart de la fourniture seulement, on admettra les tolérances indiquées au tableau. Il est évident que les tolérances sur la longueur devront se compenser, c'est-à-dire qu'il y aura autant de traverses avec la tolérance en plus qu'avec la tolérance en moins.

En mesurant l'épaisseur et la largeur, on ne tiendra pas compte de l'aubier.

Les traverses seront droites sur les deux faces horizontales, et dans l'autre sens on n'y tolérera pas de courbure dont la flèche dépasserait 10 centimètres.

TABLEAU des dimensions normales des traverses et des tolérances sur divers chemins.

CHEMINS.	LONGUEUR de toutes les traverses.	ÉPAISSEUR AU MILIEU, aubier déduit.				LARGEUR.			
		Traverses équarries		Traverses demi-rondes		Traverses équarries		Traverses demi-rondes	
		de joint.	in-term.	de joint.	in-term.	de joint.	in-term.	de joint.	in-term.
	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
Paris à Strasbourg. .	2.65	0.15	0.15	0.18	0.165	0.33	0.28	0.36	0.33
Paris à Lyon.	2.80	0.17	0.16	0.17	0.15	0.35	0.21	0.35	»
Tours à Nantes. . . .	2.75	0.14	0.14	0.14	0.14	»	0.28	0.32	0.22
Orléans à Vierzon. . .	2.60	0.15	0.14	0.15	0.15	0.32	0.22	0.32	0.22
Amiens à Boulogne. .	2.55	0.15	0.15	0.15	0.15	»	0.21	»	0.21

CHEMINS.	Tolérance en plus ou en moins						TOLÉRANCE sur la courbure.
	sur la longueur.		sur la largeur.		sur l'épaisseur.		
	Équarries.	Demi-rondes.	Équarries.	Demi-rondes.	Équarries.	Demi-rondes.	
	m.	m.	m.	m.	m.	m.	
Paris à Strasbourg. .	0.10	0.10	0.04	0.02	0.01	0.01	1/26
Paris à Lyon.	0.10	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	1/20
Tours à Nantes. . . .	0.15	0.15	0.04	0.04	0.02	0.02	1/15
Orléans à Vierzon. . .	0.25	0.25	0.04	0.04	0.02	0.02	1/20
Amiens à Boulogne. .	0.15	0.15	0.02	0.02	0.01	0.01	1/20

Lorsque l'aubier est payé, le cahier des charges stipule ordinairement un maximum pour l'épaisseur.

Les bois pour traverses doivent être coupés du 15 octobre au 15 mars, et ils ne doivent pas avoir plus de deux ans de coupe. Pour des traverses, roues hydrauliques, etc., on peut employer le bois de chêne presque immédiatement après l'abatage; pour la charpente et la menuiserie, il doit avoir au moins une année de coupe.

Pour le chemin de Paris à Strasbourg, le stère de bois débité et rendu sur place a coûté 70 fr. entre Nancy et Strasbourg, 74 fr. entre Paris et Châlons et de Metz à Nancy; sur le chemin de Lyon il a coûté 73 fr., et sur celui de Tours à Nantes, 57 fr. seulement. Pour la section de Calais à Lille et de Lille à Dunkerque, le sapin de Stettin est revenu à 50 fr. le stère rendu au port de Dunkerque ou de Calais, mais non débité. Les traverses sont triangulaires et le bois injecté.

Pour calculer le prix de la traverse remplissant les conditions du cahier des charges, en partant de celui du mètre cube de bois, on a supposé au chemin de Strasbourg que les livraisons se composent de moitié traverses équarries et moitié demi-rondes; mais le fournisseur n'en est pas moins libre de donner telle proportion qui lui convient d'équarries ou de demi-rondes. En supposant 70 fr. pour le prix du mètre cube, on trouve par cette méthode 9 fr. 20 c. pour la traverse de joint, et 7 fr. 75 c. pour la traverse intermédiaire. On évite ainsi l'opération du cubage.

Les traverses en chêne de bonne qualité, purgées d'aubier et bien enveloppées de ballast, paraissent durer longtemps. Ainsi, au chemin de fer de Versailles (rive gauche), ouvert en 1839, et où le bois était de bonne qualité, M. Bergeron a constaté, en 1846, que toutes les traverses bien enterrées, celles surtout qui reposaient sur du sable un peu gras, étaient en aussi bon état que le jour qu'on les a posées.

En 1846, de Paris à Clamart, pour une longueur de 14750 mètres, on n'avait encore remplacé que cinquante traverses environ. La plupart

ont été mises à la réforme parce qu'elles étaient fendues dans la longueur suivant les trous des chevillettes, ou n'étaient composées que d'aubier entièrement décomposé. Le chef poseur a déclaré que sur cette section quarante nouvelles traverses environ devaient être bientôt remplacées. De Clamart à Bellevue (3127 mèt.), les nombres des traverses remplacées et en mauvais état n'étaient que quinze et trente ; de Bellevue à Chaville (4100 mèt.), ces nombres étaient dix et vingt, et de Chaville à Versailles (4900 mèt.), huit et vingt.

Il est à remarquer que les traverses, avant leur pose définitive, avaient déjà servi pendant deux ans aux terrassements.

Le grand nombre de traverses fendues de la première section doit être attribué à ce que la longueur de $2^m,20$ à $2^m,40$ des traverses était insuffisante.

M. Polonceau avait déjà remarqué au chemin de Strasbourg à Bâle que les traverses bien enveloppées de sable se sont bien conservées.

La préparation par le sublimé corrosif (procédé de Kyan), généralement préférée il y a quelques années, est aujourd'hui abandonnée. Il paraîtrait, au dire de quelques ingénieurs anglais, que le sublimé ne prolonge pas de plus d'une année la durée du bois.

La créosote est le réactif auquel les ingénieurs anglais les plus célèbres donnent la préférence. Le chêne en absorbe une plus grande quantité que le sapin.

Les sapins du Nord de bonne qualité, employés pour traverses en Angleterre, ne paraissent pas durer plus de trois ans quand ils n'ont pas été préalablement injectés. Les traverses en mélèze, que l'on emploie quelquefois en Angleterre, paraissent durer de douze à quatorze ans, même sans avoir été préparées (Booth).

MM. Brunel et Stephenson, ainsi que M. Henner, chargé spécialement de la préparation des bois sur le chemin de Bristol, s'accordent pour déclarer qu'en préparant les traverses par la créosote, on peut employer des bois de qualité inférieure, tels par exemple que certains pins d'Écosse à tissu grossier et lâche.

La créosote impure, employée en Angleterre pour la préparation des traverses, est extraite du goudron de houille, produit des usines à gaz. On retire environ de 30 à 40 de créosote pour 100 de goudron. Le résidu est pour ainsi dire sans valeur.

Le goudron coûte en Angleterre 1 à 1,5 denier (10 à 15 cent.) le gallon (4,54 litres); lorsqu'il coûte 1 denier, la créosote revient à 3,5 deniers.

L'absorption est de 1 gallon de créosote par pied cube de bois.

Lorsque la créosote est rare, on y mêle moitié de son poids de pyrolignite de fer et d'eau. Mais on reproche aux dissolutions métalliques de diminuer l'élasticité des bois et de les rendre plus sujets à se fendre.

En Angleterre, le procédé assez généralement adopté pour créosoter les bois consiste à remplir de bois un grand cylindre en fonte dans lequel on fait passer de la vapeur pendant un certain temps; cette va-

peur, en amollissant le bois, facilite la sortie de la séve, et en se condensant produit un vide partiel, que l'on rend plus complet par l'action de pompes à air. On met alors le cylindre en communication avec un bassin rempli de créosote chauffée à 90° Fareinheit (246). Ce réactif s'introduit naturellement dans les pores du bois vides d'air. On foule ensuite au moyen de pompes jusqu'à une pression de 10 atmosphères environ. Le bois reste sous cette pression pendant 3 heures avant de le retirer. On opère ainsi sur trois charges en 24 heures.

Quelquefois on ne fait pas le vide dans le cylindre; on ne chauffe que faiblement la créosote en opérant sous une pression de 8 atmosphères, et on laisse les traverses séjourner 8 heures dans le réactif. Le premier procédé est préférable. L'augmentation de poids des traverses est d'environ 9 livres par pied cube.

L'expérience paraît avoir démontrée que le procédé de M. Margary était le plus simple, le plus économique et le plus certain. Il consiste en une dissolution de 1 kilog. de sulfate de cuivre pour 60 kilog. d'eau, dans laquelle on immerge les bois pendant 2 jours par chaque pouce d'épaisseur, c'est-à-dire pendant 20 jours pour une traverse de 0m,25 d'épaisseur. En hiver cette durée paraît être un peu faible.

Au chemin d'Amiens à Boulogne, on a employé 18 kilog. de sulfate de cuivre par mètre cube d'eau.

Des bois blancs, pénétrés de sulfate de cuivre, et placés dans le sol comme les traverses des chemins de fer, ou exposés à l'action des agents atmosphériques, se sont mieux conservés que le chêne placé dans les mêmes circonstances.

Une simple immersion du bois n'a pas toujours paru suffisante, et on a eu recours à la compression ou à l'aspiration pour faire pénétrer le liquide (procédé de M. Bréant).

415. *Coussinets.* Les coussinets doivent être parfaitement conformes au modèle envoyé par la compagnie du chemin de fer (421). Ce modèle doit coïncider exactement avec les faces du rail, avec lesquelles il doit être en contact, et, afin que tous les coussinets jouissent de la même propriété, il convient de les mouler avec un modèle métallique bien dressé et bien ajusté sur le rail; c'est ainsi que MM. Ransome et May, fondeurs d'Ipswich, ont moulé les coussinets du chemin de Londres à Douvres, d'après le modèle de M. W. Cubitt. Cet ingénieur a placé les trous des chevillettes non sur une même ligne normale à l'axe du coussinet, afin qu'il y ait moins tendance à fendre les traverses en enfonçant les chevillettes; cette disposition a été employée au chemin d'Amiens à Boulogne, où on a arrondi les extrémités du patin, qui n'est pas alors rectangulaire.

Le rail est en contact avec le coussinet par toute sa face inférieure; mais la face non située du côté du coin ne porte souvent contre la joue du coussinet qu'à la partie inférieure, et sur une hauteur de 0m,01 environ à la partie supérieure.

Les coussinets doivent être en fonte, d'un grain ni trop gros et trop lâche, ni trop fin et trop serré; ils doivent être exempts de soufflures, gouttes froides et autres défauts du même genre.

La difficulté d'obtenir une marche régulière d'un haut-fourneau, et, par suite, des produits toujours d'une bonne qualité, devrait ne faire employer, comme aux chemins de fer de Saint-Germain, de Versailles (rive gauche et rive droite) et d'Orléans, que de la fonte de seconde fusion; cependant le gouvernement français, à l'imitation du gouvernement belge, a admis, pour les chemins de fer de l'État, les coussinets de fonte de première fusion aussi bien que ceux de fonte de seconde fusion.

On juge de la qualité des coussinets en en cassant quelques-uns pris au hasard dans chaque fourniture; mais, comme il est à craindre qu'on ne les coule avec des fontes provenant de hauts-fourneaux marchant à l'air chaud, qui, quoique d'une faible ténacité, présentent un grain satisfaisant, le gouvernement prescrit, avec raison, des essais à faire sur la fonte qui sert à les couler; la résistance absolue doit être de 1500 kilog. au moins par centimètre carré de section (211).

La tolérance admise pour le poids des coussinets, dans le cahier des charges de l'État, est de 3 pour 100. Au chemin de fer de Strasbourg, elle a été réduite à 2 pour 100. D'un autre côté, on a réduit de 1500 à 1300 kilog. l'effort de traction par centimètre carré que la fonte du coussinet doit supporter avant de se rompre.

La fonte doit être non-seulement tenace, mais aussi elle doit résister au choc; il conviendrait d'indiquer un essai qui assurât de cette qualité.

L'ingénieur peut rejeter la totalité des coussinets quand il y en a 1/7 de mauvais, et la compagnie a droit aux dommages-intérêts qui ont été fixés à l'avance.

La compagnie du chemin de fer a à l'usine un agent de son choix, chargé de surveiller la fabrication des coussinets, et qui en fait arrêter le coulage si l'allure du haut-fourneau se dérange; mais, malgré cette précaution et tous les soins que l'on peut prendre pour s'assurer de la bonne qualité des coussinets, le fournisseur doit encore garantir sa marchandise pendant une année de service.

Aux chemins de fer de Saint-Germain, de Versailles et d'Orléans, les coussinets, fournis en grande partie par l'usine de Fourchambault, ont coûté de 300 à 340 fr. la tonne de 1000 kilog. rendue à Paris.

Pour le chemin de fer de Versailles à Chartres, la fourniture de 300000 coussinets, divisée en 4 lots, a été adjugée : les 1er et 3e lots, à M. Mertian, de Montataire (Oise), aux prix de 208f,40 et 215 fr. la tonne rendue sur la ligne; le 2e lot, à M. Gendarme, de Charleville (Ardennes), au prix de 224f,90; et le 4e à M. Lemonissen, de Saint-Dizier (Haute-Marne), au prix de 222f,35.

TABLEAU des poids et dimensions principales des coussinets de quelques chemins de fer (tableau page 525) (*).

COUSSINETS.		Paris à Orléans.	Paris à Rouen.	Du Nord.	Montereau à Troyes.	Paris à Strasbourg.	Londres à Birmingham.
Poids du coussinet.	intermédiaire.	9k.20	9k.50	8k.50	8k.00	10k.30	11k.70
	de joint.	»	»	11 .35	11 .30	12 .30	»
Patin.	Longueur, suivant celle du rail. de joint.	0m.104	0m.116	0m.105	0m.110	0m.110	0m.125
	Longueur, suivant celle du rail. interm.	»	»	0 .130	0 .133	0 .150[a]	»
	Largeur, suivant celle du rail.	0 .245	0 .240	0 .250	0 .305[b]	0 .270	0 .270
	Epaisseur entre les deux nervures, aux trous des chevillettes [g].	0 .033	0 .030	0 .030	0 .037	0 .032	0 .029
	Épaisseur sous le rail.	0 .045	0 .042	0 .040	0 .041	0 .045	0 .045
Joue intérieure.	Epaisseur au bas.	0 .020	0 .020	0 .018	0 .022	0 .030	0 .030[h]
	Epaisseur en haut.	0 .010	0 .016	0 .016	0 .015	0 .015	0 .018
Joue extérieure.	Epaisseur au bas.	0 .027	0 .032	0 .019	»	»	0 .024
	Epaisseur en haut.	0 .011	0 .016	0 .015	»	»	0 .016
	Hauteur, depuis le dessous du patin [i].	0. 130	0 .132	0 .130	0 .135	0 .135	0 .138
Section transversale des coins.	Dimension maxima horizontale.	0 .045	0 .045	0 .051	0 .047	0 .050	0 .048
	Dimension maxima verticale	0 .073	0 .054	0 .068	0 .000	0 .060	0 .048
Trous des chevillettes.	Diamètre en haut.	0 .020	0 .021	moyen.	0 .030[n]	moyen.	0 .020
	Diamètre au bas.	0 .019	0 .019	0 .020	0 .0305	0 .020	0 .022
Longueur moyenne des joues ou de la surface de serrage (suivant la longueur du rail).		0 .075	0 .088	0 .079	0 .070	0 .078	0 .070
Id. pour le coussinet de joint.		»	»	0 .105	0 .100	0 .110	»
Ouverture horizontale entre les parties supérieures des joues.		0 .06	0 .065	0 .061	0 .054	0 .056	0 .065
Hauteur totale du dessus du rail au-dessous du patin.		0 .159	0 .169	0 .155	0 .100	0 .175	0 .171

(*) A l'exception des dimensions suivant la longueur du rail, toutes les autres sont les mêmes, ou à peu près, pour les coussinets de joint que pour les coussinets intermédiaires.

[a] cette longueur 0m,15 ne subsiste qu'au milieu du coussinet sur une largeur de 0m,14; aux extrémités la longueur est égale à celle uniforme 0m,11 du coussinet intermédiaire;

[b] ce patin n'est pas rectangulaire; il est à peu près demi-circulaire aux extrémités.

[g] quelquefois cette épaisseur n'existe qu'à l'emplacement des trous, et on la diminue un peu ailleurs, de manière à avoir une rondelle en saillie autour du dessus de chaque trou. Sur le chemin de Montereau à Troyes, le dessous du patin est refouillé, de manière qu'il ne repose sur la traverse que par une bande qui règne sur tout son pourtour. Cette disposition a également été employée sur les chemins de fer d'Amiens à Boulogne et de Fampoux à Hazebrouck;

[h] le coin est du côté de la nervure la moins élevée;

[i] la joue intérieure est de 0m,01 environ moins élevée que la joue extérieure, afin qu'elle ne touche pas aux rebords des roues; elle est également élevée au chemin de Paris à Rouen. Chaque joue intérieure et extérieure est contenue par deux nervures qui s'élèvent jusqu'à sa partie supérieure;

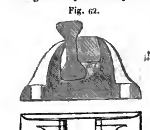
[n] les chevillettes sont en bois.

Les dimensions données pour le patin sont prises pour la face inférieure; les faces latérales sont inclinées de manière à réduire les dimensions de la face supérieure, de laquelle partent les joues et les nervures, qui vont un peu en s'amincissant de bas en haut.

Sur quelques lignes d'Angleterre, on emploie des coussinets dont le poids s'élève jusqu'à 18 kilog.

L'accident de Fampoux étant attribué par plusieurs personnes à l'absence d'un coin dans l'un des coussinets de joint, M. Edwards, ex-ingénieur en chef du matériel du chemin de fer de Paris à Strasbourg, a imaginé de placer au joint un coin supplémentaire en fer.

Fig. 62.



Dans la figure 62, qui représente, à l'échelle de 1/8, la coupe et le plan d'un coussinet intermédiaire, la partie non hachée est la modification apportée pour le coussinet de joint.

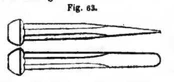
b ergot venu à la fonte, aux extrémités duquel sont des nervures également venues à la fonte;

a coin ou prisonnier en fer que l'on enfonce entre le rail et l'ergot, et qui est maintenu latéralement par les nervures de l'ergot.

416. *Chevillettes.* Elles sont en fer de seconde qualité, et on les essaye en en ployant quelques-unes sous un angle de 45° et en les redressant ensuite; à cette opération, qui se fait à froid, à l'aide d'un marteau, elles ne doivent ni se rompre ni se criquer. La tête doit être refoulée, et non rapportée et soudée; elle sauterait quand on la frappe avec la masse pour enfoncer la chevillette. Il convient même, à l'essai, de la frapper avec le marteau en cherchant à la faire sauter.

La fig. 63 représente au 1/5 la chevillette du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

Fig. 63.



Extrait du cahier des charges pour le chemin de Paris à Strasbourg. Les formes et dimensions des chevilles seront exactement conformes aux modèles poinçonnés qui seront remis au fournisseur par la compagnie.

Le poids de la cheville, qui doit être de 0k,300, sera constaté contradictoirement, aussitôt après la fabrication des premières chevilles.

A la réception, il sera accordé sur ce poids constaté une tolérance de 2 pour 100 en plus ou en moins sur chaque cheville; mais la fourniture totale ne devra pas s'écarter de plus de 1 pour 100 du poids de 300 gr. par cheville. Dans ces limites, la compagnie payera le poids réel; l'excédant, s'il y en a, ne sera pas payé au fournisseur.

Il ne sera accordé aucune tolérance, ni en plus ni en moins, sur le diamètre des 5 premiers centimètres de la longueur de la cheville, immédiatement sous la tête de la cheville.

Deux gabarits trempés et poinçonnés par la compagnie seront remis aux fournisseurs. Toute cheville qui n'entrera pas jusqu'à la tête dans le plus grand, ainsi que toutes celles qui entreront jusqu'à la tête dans le plus petit, seront rejetées.

Les chevilles seront en fer de bonne qualité, doux et nerveux. La tête sera refoulée dans la masse et non rapportée.

L'épreuve consistera à enfoncer la chevillette dans un bloc de chêne jusqu'à la moitié de sa longueur, et à frapper latéralement dans la partie supérieure, de manière à lui faire faire un angle de 45° avec la partie verticale enfoncée dans le bloc. Lorsqu'un dixième des chevilles soumises à cette épreuve aura cassé, ou aura été détérioré, la totalité de la fourniture présentée pourra être refusée.

Outre les chevilles rebutées à leur réception à l'usine, celles qui, à l'emploi, seront reconnues inadmissibles, ou par défaut de qualité, ou par excès de dimensions, seront rejetées et remplacées par le fournisseur et à ses frais.

La fourniture de 150 000 chevillettes, pour le chemin de Paris à Rennes, a été adjugée à M. Leclerc, de Valenciennes, au prix de 414 fr. la tonne.

L'oxydation est un grave inconvénient des chevillettes en fer. Au chemin de fer de Manchester à Liverpool, après un service de plusieurs années, une chevillette, qui dans l'origine avait 0m,019 de diamètre, a été réduite à 0m,009 seulement, tandis que le diamètre du trou du coussinet s'est agrandi de 4 millimètres; on conçoit combien ces 14 millimètres de jeu devaient rendre faciles les vibrations de la voie et hâter la destruction du matériel.

MM. Ransome et May remplacent les chevillettes en fer par celles en bois, qu'ils taillent suivant les fibres du bois dans des morceaux de cœur de chêne. Ils commencent par leur donner, sur le tour, des dimensions plus grandes que celles qu'elles doivent avoir une fois terminées; ils les forcent dans des moules en fonte dont les dimensions intérieures sont celles des chevillettes préparées, et avant de les retirer du moule, ils les exposent pendant une demi-heure à l'action de la vapeur, à une température suffisante pour opérer une espèce de fusion de la résine et de la séve que contient le bois; laissant ensuite refroidir le moule, le bois a acquis une compression presque permanente, et il n'offre plus les inconvénients de gonflement et de contraction suivant les circonstances atmosphériques comme les chevillettes ordinaires en bois.

Par la compression, le volume de ces chevillettes est réduit à 65 pour 100 de son volume primitif, et la force transversale a augmenté de 50 pour 100.

La tige de ces chevillettes est un tronc de cône dont le diamètre à l'extrémité est de 0m,001 plus grand que près de la tête; par là, il n'y a pas tendance à ce qu'elle sorte de la traverse. La tête est aussi un tronc de cône qui se loge dans le trou du coussinet, et dont le petit diamètre est égal au plus petit de la tige.

Les chevilles en bois paraissent avoir en Angleterre de nombreux partisans. En France, le chemin de Troyes à Montereau est le seul où on les a appliquées.

417. *Coins.* Ils doivent être d'un modèle bien choisi; le bois doit

être sec, de droit fil, compacte et autant que possible exempt de nœuds ou autres défauts. Le bois ne doit pas être débité à la scie ; il doit être fendu, et comme alors il n'a pas des formes assez régulières pour être passé au rabot, on obtient une bonne préparation en forçant le coin à coups de marteau dans une matrice en fer, dont le bord tranchant lui donne une forme qui approche de celle qu'il doit avoir définitivement.

On emploie généralement en Angleterre des machines pour la fabrication des coins. Avec de bonnes machines, on fabrique quatre coins par minute. La façon seule se paye 50 fr. par 1000 coins. Une machine de ce genre coûte 1750 à 1875 fr.

La fourniture de 75 000 coins, pour le chemin de Rennes, a été adjugée à M. Corpazen, de Chelles, au prix de 140 fr. le mille.

Les coins ont environ 0m,25 de longueur. Leurs faces latérales doivent le mieux possible avoir les formes exigées par la joue du coussinet et la face latérale du rail. Le tableau page 517 donne les dimensions de leur section transversale moyenne sur quelques chemins.

Extrait du cahier des charges, chemin de Strasbourg. Les coins auront 0m,26 de longueur, 0m,06 de hauteur et environ 0m,05 d'épaisseur. Leurs faces supérieures et inférieures seront planes et parallèles ; leurs faces latérales seront courbes et auront exactement le profil indiqué par le dessin approuvé par la compagnie, qui sera remis au fournisseur, revêtu de la signature de l'ingénieur en chef du matériel.

Les dimensions de la petite base du coin seront telles qu'il entrera, à la main, de 2 centimètres dans le gabarit poinçonné par la compagnie, qui sera remis au fournisseur ; l'extrémité du coin ainsi présenté devra remplir exactement l'orifice du gabarit.

L'épaisseur de la grande base du coin sera de 8 millimètres plus forte que celle de la petite base.

Les coins seront en bois essence de chêne, ou d'acacia, compacte et bien sec. Ils seront sains, exempts de tous nœuds, roulures, gerçures, piqûres, etc., sans aubier ni bois blanc ; ceux qui présenteraient des flaches ou auraient été entaillés seraient rejetés.

Les coins seront taillés ou refendus de fil, dans le cœur du bois, et non débités à la scie. La dernière forme, celle exacte du dessin et modèle poinçonné, sera donnée au rabot.

Les coins qui seraient rebutés à la réception, ou pendant la pose, devraient être immédiatement remplacés par le fournisseur ou à ses frais.

418. *Rails.* La longueur des rails en fonte n'a jamais dépassé 1m,20 ; celle des rails en fer est le plus souvent de 4m,50 ; pour le chemin de fer de Paris à Rouen on l'a portée à 4m,80, et à 5m,50 pour celui de Vierzon. La compagnie des chemins de fer du Midi a adopté la longueur de 5 mètres pour le rail Barlow et 6 mètres pour celui Brunel.

A longueur égale, les rails en fer coûtent moins que ceux en fonte ; cela tient à ce que le fer employé à leur fabrication est de deuxième qualité, au lieu que la fonte doit être de première qualité. De plus, les rails en fer résistent mieux aux chocs et aussi bien aux causes de destruction atmosphériques que ceux en fonte, lesquels, une fois la croûte dure qui les recouvre usée, sont promptement détruits.

Fig. 64.



La section des rails en fer est ordinairement celle de deux champignons placés aux extrémités d'une même tige. Quelquefois, comme l'indique la figure 64, qui donne le tracé de la coupe du rail de Paris à Strasbourg, les deux champignons sont tout à fait semblables, de sorte que, quand l'un est usé, on peut retourner le rail; mais alors le champignon usé coïncide mal avec le coussinet, et il devient difficile de rendre la voie bien unie et bien solide. Malgré cet inconvénient, sur le chemin de Saint-Étienne on a retiré de grands avantages de pouvoir retourner les rails (419). Quelquefois le champignon inférieur est remplacé par un simple bourrelet; quelquefois encore il n'y a ni champignon inférieur ni bourrelet. (Consulter le tableau page 525.)

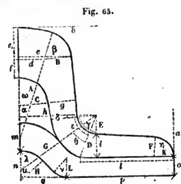
Les anciens rails étaient à champignons bombés; puis on les a abandonnés pour faire leur face supérieure plane, plus ou moins arrondie sur les bords; et pour les chemins construits depuis environ onze ans on a donné la préférence à la première forme de champignons.

Au chemin de fer d'Auteuil on vient d'employer partout le rail Brunel, fig. 65, excepté aux changements et croisements de voies, où l'on a mis le rail à double champignon et les aiguilles ordinaires.

La compagnie des chemins de fer du Midi a adopté le rail Brunel pour la ligne de Bordeaux à Bayonne, parce que ce rail repose sur longrine, et que le sapin des Landes ne coûte que 55 fr. le stère; on l'emploie aussi pour les voies de garage, les remises et les gares.

La fig. 65 représente la moitié de la coupe du rail Brunel et de sa selle à l'échelle de 1/2.

Fig. 65.



	Du rail.	De la selle.
Section.	0m,003856	0m,001923
Poids par mètre courant. . . .	30k,00	15k,00
Longueur. . . .	6m,00	0m,40
Poids.	180k,00	6k,00

Dimensions en millimètres : $a=71$, $b=83.5$, $c=20$, $d=14$, $e=17.25$, $f=9.75$, $e+f=27$, $g=15$, $h=31$, $i=13$, $k=10.75$, $l=52$, $m=15$, $n=14.25$, $m+n=29.25$, $o=10$, $p=58.25$, $q=25$.

Rayons des raccordements en millimètres : A $=60$, B $=15$, C $=15.50$, D $=25$, E $=10$, F $=11$, G $=25$, H $=15$, L $=10$.

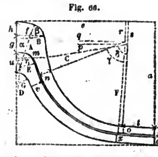
Angles de raccordements : $\alpha=18°15'$, $\beta=68°$, $\gamma=82°30'$, $\delta=3°50'$, $\varepsilon=63°40'$ $\eta=86°$, $\theta=31°15'$, $\lambda=55°$, $\mu=43°$, $\nu=43°$.

Les files de rails sont réunies, de 3 en 3 mètres, aux joints des longrines et à ceux des rails, par des traverses en bois; les joints des rails se trouvent aux milieux des pièces formant les longrines; ces pièces ont 6 mètres de longueur comme les rails.

Chaque extrémité de rail est fixée à la selle par 4 rivets de 18 millim. de diamètre et de 50 millim. de longueur de tige avant la rivure, et un boulon de 15 millim. de diamètre de tige, placé alternativement à droite et à gauche du rail, près des selles et tous les $0^m,50$ de longueur de rail, relie le rail sur la longrine.

Pour la grande ligne du Midi on emploie uniquement le rail Barlow, lequel ne contenant aucune partie en bois, promet une grande durée. La fig. 66 représente la moitié de la coupe de ce rail et de sa selle à l'échelle de 1/4.

Fig. 66.



	Du rail.	De la selle.
Section.	$0^m,005784$	$0^m,004080$
Poids par mètre courant.	$45^k,00$	$31^k,742$
Longueur.	$5^m,00$	$0^m,60$
Poids.	$225^k,00$	$19^k,043$

Dimensions en millimètres : $a=115$, $b=10$, $a+b=125$, $c=1.5$, $d=9$, $e=150$, $f=29$, $g=17$, $h=15$, $h+g=32$, $l=14$, $m=33$, $n=13$, $o=10$, $p=120.25$, $q=118$, $r=22.75$; $s=24.25$, la partie droite $t=36.25$ pour le dessus du rail, 38.75 pour le dessous, 39.25 pour le dessus de la selle, et 41 pour le dessous : toutes ces parties droites sont inclinées au 1/15; $u=22$, $v=11$, $x=d=9$.

Rayons des raccordements en millimètres : A=60, B=15.25, C=88.25, D=50, E=15, F=100. Pour la selle on a : A=50, B=13, C=101.25; F=111.50, G=12, les arrondis des extrémités des lèvres ont 2 millim. de rayon.

Angles des raccordements : $\alpha=18°20'$, $\beta=62°$, $\gamma=65°$, $\delta=76°20'$, $\varepsilon=7°$, $\eta=61°40$. Pour la selle on a : $\alpha=7°30'$, $\beta=63°45'$, $\gamma=58°$, $\delta=67°$, l'angle unique de G avec la verticale est de 61°55'.

Le rail Barlow repose directement sur le ballast; mais on dame bien le sable sous le rail, que l'on incline au 1/20 vers l'axe de la voie. Les selles ne sont placées qu'aux joints des rails, 12 rivets, dont la tige a 23 millim. de diamètre, et 60 millim. de longueur avant la rivure, fixent les extrémités des deux rails sur la selle, en amenant les lèvres en contact tout en assurant la superposition du haut du rail sur la selle. Une entretoise en fer placée à côté de la selle et fixée au rail par deux rivets relie les deux files de rail. Ces entretoises sont des cornières de 13 millim. d'épaisseur moyenne, et de 100 millim. dans un sens et 65 millim. dans l'autre; leur longueur est $1^m,85$, leur section $0^{mq},002$, et leur poids $29^k,202$ (pag. 529).

Des expériences ont été faites à l'usine de Decazeville dans le but de

comparer les résistances des rails à double et à simple champignon. Les résultats se sont accordés avec la théorie pour donner, à poids égaux, l'avantage aux rails à double champignon, contrairement à l'opinion de M. Barlow. Cependant le nombre des partisans des rails à simple champignon, ou plutôt à double champignon, mais dont l'un est petit et ne sert qu'à fixer le rail, augmente chaque jour. Des modèles de cette espèce ont été adoptés nouvellement pour des lignes importantes, entre autres les cinq dernières du tableau page 525.

Si l'on considérait un rail comme un solide encastré par ses deux extrémités, ce qui aurait lieu si les coussinets étaient parfaitement fixes et maintenaient bien horizontales les parties encastrées, on pourrait calculer ses dimensions à l'aide de la formule $\frac{RI}{n} = \frac{PL}{8}$ du n° 224, dans laquelle on remplacerait I et n par les valeurs qui conviennent à la section du rail, pages 264 et suivantes. On peut, jusqu'à un certain point, considérer le rail comme étant encastré pour les parties qui ne correspondent pas à un joint; mais les parties qui y correspondent ne peuvent être considérées que comme un solide encastré par une extrémité et reposant librement sur un appui par l'autre; de sorte que, pour déterminer ses dimensions, il faudrait faire usage des formules du n° 223 dans lesquelles I et n auraient, comme ci-dessus, les valeurs qui conviennent à la section du rail. La résistance étant plus faible dans ce dernier cas que dans le premier (223 et 224), comme la section du rail est partout uniforme, quelques ingénieurs ont moins écarté les coussinets des joints de leurs voisins que ne le sont les autres entre eux. (Observations du tableau page 525).

Non-seulement il faut que les rails ne se rompent pas sous les charges qu'ils supportent, mais aussi que leurs vibrations ne soient pas trop fortes. On conçoit qu'il est impossible de tenir compte analytiquement de toutes les circonstances dans lesquelles se trouvent les rails pour résister, circonstances qui sont encore compliquées par le mouvement de la charge, et qu'il n'y a que la pratique qui pourra conduire aux formes et aux dimensions les plus convenables à donner aux rails.

D'après les expériences faites il y a quelques années par le docteur Barlow, à l'aide d'un déflectomètre de son invention, avec des blocs ou des traverses fermes, des coussinets bien fixés et des joints bien faits, la route elle-même étant solide, le rail est seulement fléchi, à la plus grande vitesse, d'une quantité très-peu supérieure à celle due à une charge en repos égale à la moitié du poids sur les deux roues, mais que, par suite de l'imperfection de ces parties, l'effort peut quelquefois produire une flèche environ double de celle due à la charge en question. Il s'ensuit que, jusqu'à ce qu'une plus grande perfection puisse être obtenue dans les rail-ways, on doit adopter une force de barre plus que double de celle nécessaire pour supporter les machines

en repos. M. Barlow estime qu'une augmentation de 10 à 20 pour 100 au-dessus du double est suffisante, c'est-à-dire que pour une petite machine à 6 roues de 12 tonnes, comme le poids est distribué, un rail résistant à 7 tonnes serait grandement suffisant, et qu'avec un plus grand soin de construction, tel qu'on doit l'attendre maintenant, on pourrait, pour cette même force de rail, employer avec toute sécurité des machines de 14 à 16 tonnes.

TABLEAU des expériences faites à l'usine de Decazeville sur la résistance des rails du chemin de fer de Paris à Orléans. Le poids du mètre courant de rail était de 29k.21. Le rail reposait sur deux appuis de 0m.05 de largeur, écartés de 1m,25 d'axe en axe; la charge était appliquée au milieu, sur une largeur de 0m,07. (Extrait de la Métallurgie de MM. Flachat, Petiet et Barrault.)

CHARGE en tonnes.	RAILS avec riblons et fin-métal.		RAILS en fin-métal pur.		RAILS avec fonte au bois et fin-métal.	
	Flèche.	Flèche conservée, la charge étant enlevée.	Flèche.	Flèche conservée, la charge étant enlevée.	Flèche.	Flèche conservée, la charge étant enlevée.
	m.	m.	m.	m.	m.	m.
8	0.0015	0.0000	0.0010	0.0000	0.0010	0.0000
9	0.0020	0.0000	0.0015	0.0000	0.0015	0.0000
10	0.0025	0.0000	0.0020	0.0000	0.0025	0.0000
11	0.0035	0.0000	0.0040	0.0000	0.0045	0.0000
12	0.0050	0.0000	0.0055	0.0000	0.0060	0.0000
13	0.0065	0.0010	0.0070	0.0015	0.0080	0.0020
14	0.0085	0.0020	0.0090	0.0030	0.0105	0.0035

Les expériences de ce tableau ont été faites avec un appareil qui permettait de laisser agir la charge autant de temps qu'on le désirait, et de l'enlever ensuite pour reconnaître jusqu'à quelle limite le rail, après avoir fléchi, pouvait revenir sur lui-même par son élasticité. Cette limite est entre 14 et 15 tonnes; au delà, le rail fléchit sans revenir aucunement sur lui-même. Les nombres du tableau sont des moyennes d'expériences faites sur des rails du chemin de fer de Paris à Orléans, dont les couvertures (assises supérieure et inférieure des trousses, 420) étaient faites, les premières avec un mélange de fin-métal et de riblons, les secondes avec du fin-métal pur, les troisièmes avec un mélange de fin-métal et de fonte au bois, celle-ci remplaçant les riblons (421).

TABLEAU des poids, par mètre courant, et des dimensions principales de la section transversale des rails employés sur quelques chemins de fer.

DÉSIGNATION DES CHEMINS.	POIDS des rails par mètre courant.	ÉCARTEMENT des points d'appui.	POIDS du coussinet ordinaire n.	LARGEUR du champignon		LARGEUR du bourrelet.	LARGEUR de la tige.	HAUTEUR totale.
				supér.	infér.			
	k.	m.	k.	m.	m.	m.	m.	m
St.-Ét. à Lyon. . . 1er rail.	13.00	0.90	3.00	0.043	»	0.020[b]	0.014	0.083
Id. nouveau rail.	30.00	*k*	7.00	0.054	0.054	»	0.0175	0.115
Montpellier à Cette.	20.00	0.00	»	0.052	»	0.023[b]	0.015	0.100
Paris à Saint-Germain. . . .	30.00	1.12	9.85	0.060	0.060	»	0.015	0.114
Paris à Versailles (rive g).	30.00	1.12	0.60	0.062	»	0.038	0.020	0.115
Alais à Beaucaire.	31.00	1.12	10.00	0.004	0.004	»	0.015	0.115
Paris à Orléans.	30.00	*k'*	0.20	0.053	0.054	»	0.010	0.111
Strasbourg à Bâle.	25.00	0.00	8.50	0.060	0.000	»	0.010	0.095
Paris à Rouen.	30.00	*k''*	9.50	0.064	0.064	»	0.019	0.128
Loudres à Southampton. . .	37.12	1.20	»	0.067	0.069	»	0.021	0.126
Id.	33.00	1.20	»	0.004	0.058	»	0.010	0.134
Grand Junction.	31.00	1.12	»	0.067	0.058	»	0.018	0.113
Id.	31.00	1.12	n	0.071	0.002	»	0.010	0.112
Londres à Birmingham. . .	31.00	1.12	»	0.002	0.062	»	0.017	0.114
Id.	37.00	1.20	11.70	0.065	0.070	»	0.021	0.120
Liverpool à Manchester. .	37.12	1.20	10.00	0.070	0.001	»	0.017	0.128
Id.	29.70	0.00	»	0.078	0.067	»	0.018	0.100
Stockton à Darlington, nouveau rail.	36.00	1.10	»	0.062	0.062	»	0.0175	0.126
Id.	31.00	1.12	»	0.064	»	0.037[g]	0.022	0.124
York et North-Midland. .	27.00	0.00	»	0.002	»	0.020[b]	0.020	0.113
Brandling Junction.	22.00	0.90	»	0.053	»	0.028[c]	0.017	0.096
Chester et Birkenhead. . .	27.72	0.00	9.45	0.064	»	*d*	0.021	0.124
Id.	27.72	0.00	9.45	0.063	»	e	0.021	0.124
Newcastle à Carlisle.	24.75	0.00	7.20	0.065	»	0.025	0.016	0.110
Clarence.	21.78	0.90	»	0.055	»	0.030[c]	0.014	0.101
Eastern à Counties.	37.12	1.20	»	0.062	»	*f*	0.032	0.109
Londres à Greenwich. . . .	25.00	0.00	»	0.054	»	0.028[b]	0.022	0.108
Du Centre.	30.00	»	»	0.000	0.000	»	0.018	0.130
Du Nord.	30.20	»	»	0.060	0.060	»	0 015	0.115
De Bordeaux.	34.00	»	»	0.060	0.000	»	0.016	0.130
Avignon à Marseille.	33.20	»	»	0.064	0.000	»	0.010	0.119
Rail belge.	34.00	»	»	0.065	0.050	»	0.019	0.126
Great North of England. . .	»	»	»	0.066	0.042	»	0.018	0.125
York à Scarborough. . . .	32.33	»	»	0.007	0.054	»	0.021	0.130
Londres à Birmingham. . .	40.00	»	»	0.066	0.047	»	0.026	0.128

n le poids des coussinets de joint est de $2^{k},5$ à $4^{k},00$ plus élevé.

b bourrelets ne faisant saillie que sur une seule face de la tige : les autres sont symétriques par rapport à la tige ;

c bourrelets circulaires ayant pour diamètres les largeurs indiquées au tableau ; ils sont placés symétriquement par rapport à la tige ;

d tige unie ;

e tige unie, portant seulement d'un côté, vers le milieu de sa hauteur, une encoche triangulaire de $0^{m},004$ de profondeur ;

f tige unie portant de chaque côté une encoche en arc de cercle, de $0^{m},02$ de hauteur sur $0^{m},003$ de profondeur ;

g il n'y a pas de bourrelet proprement dit, la tige est formée par deux courbes qui vont en s'éloignant, et dont la distance au bas est $0^{m},037$, et la distance moyenne $0^{m},022$;

k $0^{m},80$ aux joints et $0^{m},00$ ailleurs ;

k' dans les tranchées dont le sol est très-bon, cet écartement est de $1^{m},00$ aux joints et de $1^{m},25$ ailleurs ; sur les remblais et dans les tranchées dont le sol est douteux, il est de $0^{m},75$ aux joints et de $1^{m},00$ ailleurs ;

k'' $1^{m},12$ aux joints et $1^{m},28$ ailleurs.

Relations qui existent, sur les lignes les plus importantes, entre le poids des rails, le poids et l'écartement des coussinets.

POIDS du mètre courant de rail.	ÉCARTEMENT des appuis.	POIDS des coussinets ordinaires.	POIDS des coussinets de joint.
15 à 20 kil.	$0^{m}.90$	7 à 8.5 kil.	9 à 11 kil.
25 à 32	$0^{m}.90$ à $1^{m}.12$	7 à 10	9 à 14
32 à 37 et au-dessus.	$1^{m}.20$	9.5 à 12	12 à 16

Des rails pesant moins de 20 kilog., avec un écartement de $0^{m},90$ entre les appuis, sont trop légers pour le service des locomotives pesant de 8 à 16 tonnes, les plus légères étant montées sur 4 roues et les plus lourdes sur 6; il convient de porter ce poids à 25 kilog. pour un écartement d'appuis de $0^{m},90$, quand on fait habituellement usage des machines de 16 tonnes; c'est le poids des rails du chemin de fer de Strasbourg à Bâle, où les coussinets ordinaires pèsent $8^{k},50$, ce qui est convenable. Pour les rails du poids de 30 kilog., tels que ceux du chemin de fer de Versailles (rive gauche) et d'Orléans, l'écartement $1^{m},12$ entre les appuis est convenable, et il convient d'adopter $9^{k},20$ pour les coussinets. Enfin, pour les rails de 36 à 37 kilog., tels que ceux du chemin de Paris à Rouen, l'écartement de $1^{m},20$ entre les appuis, et le poids de 9,50 à 10 kilog. pour les coussinets paraissent satisfaisants.

L'emploi de lourdes machines sur les chemins anglais devenant général et se propageant en France, soit dans le but de marcher à de grandes vitesses, soit dans celui de traîner des charges considérables, on se sert de rails très-lourds. Ainsi les machines pour le transport des voyageurs pesant environ 19 tonnes, non compris l'eau et le charbon que porte la chaudière, et celles destinées au transport des marchandises 22 tonnes, le poids des rails est généralement de 37 à 38 kilog. par mètre courant; ils ont $4^{m},50$ de longueur et reposent sur 4 traverses.

Avec ces proportions, la voie ayant $1^{m},44$ de largeur, les convois de voyageurs marchent avec une vitesse moyenne de 16 lieues à l'heure, arrêts compris. Sur les chemins à voies larges, où les machines sont un peu plus puissantes, la vitesse moyenne est de 18 lieues.

On emploie sur quelques chemins de très-puissantes machines pesant jusqu'à 26 tonnes et plus. Elles sont utiles pour gravir de fortes pentes; mais elles ne seraient pas avantageuses pour traîner en plaine de très-fortes charges. L'expérience a prouvé qu'il ne convenait pas de composer un convoi de marchandises de plus de 40 wagons. Les convois trop

longs éprouvent une très-grande résistance dans les courbes et sont difficiles à manœuvrer dans les gares.

419. *Usure des rails.* D'après des observations faites sur le chemin de fer de Liverpool à Manchester, la réduction de hauteur des rails est de 1/90 de pouce (0m,00028) par année. M. Polonceau, sur le chemin de fer de Mulhouse à Thann, pour une durée de 3 ans et demi et une circulation de 4 convois par jour, a trouvé un millimètre d'usure, ce qui fait, comme au chemin de Liverpool, 0m,00028 par année.

M. Locard rapporte (*Recherches sur les rails et leurs supports*) qu'au chemin de fer de Saint-Étienne, sur 1290 rails de 0m,12 de hauteur, à double champignon de 0m,055 de largeur, et pesant 30 kil. le mètre, après 5 ans et 10 mois de service, 47,36 pour 100 étaient intacts, 35,35 n'avaient pas été retournés, mais étaient attaqués en diverses parties ; 16,04 avaient été retonrnés et se trouvaient fortement attaqués sur les deux faces, enfin 1,25 pour 100 étaient hors de service.

La hauteur des rails avait été réduite de 0m,12 à 0m,118, ce qui porte leur usure annuelle à 0m,000343.

420. *Fabrication des rails.* (Extrait de la Métallurgie de MM. Flachat, Petiet et Barrault). On emploie à la fabrication des rails tous les fers, pourvn qu'ils soient durs et rigides. Ces qualités sont réunies dans la plupart des fers qui proviennent du puddlage des fontes au coke; du reste, ces fers sont les seuls qui prennent cette destination; ceux au bois sont trop chers (422), et on les réserve pour la fabrication des machines, usage auquel les fers au coke sont impropres.

Les fours employés pour la fabrication des rails sont un peu plus grands que les fours à réchauffer ordinaires; ils doivent contenir 600 à 700 kilog. de fer en 3 ou 5 paquets, suivant le poids des rails que l'on fabrique. Chaque four fait ordinairement, en 24 heures, 16 chaudes qui produisent de 6 à 8 tonnes de fer fini. Il faut avoir 5 ou 6 fours en feu pour employer convenablement un train de laminoirs conduit par une bonne machine.

En France, on n'emploie que les laminoirs à la fabrication des rails; en Angleterre, dans quelques usines, on soude les paquets au marteau, avant de les passer aux laminoirs; ainsi, au sortir du four, le fer est d'abord porté sous un marteau frontal de 3 à 4 tonnes, qui frappe de 15 à 20 coups; le fer est remis au feu pendant quelques minutes, puis seulement envoyé aux laminoirs. Cette méthode est excellente et doit diminuer les rails de rebut.

Les rails les plus forts pourraient se faire dans un train de cylindres marchands de 0m,35 de diamètre et de 1m,00 de table; mais on préfère des cylindres de 0m,45 à 0m,50 de diamètre, portant de 1m,20 à 1m,40 de table, et faisant de 55 à 65 révolutions par minute. Un train de cette espèce doit être desservi par une machine de 60 à 80 chevaux.

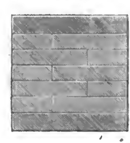
La confection d'un rail s'effectue généralement dans deux cages, dont

la première comprend les cylindres ébaucheurs, et la deuxième les cylindres finisseurs; les ébaucheurs ont au moins 5 cannelures, et les finisseurs en portent 6, dont la forme se rapproche graduellement de celle à donner au rail.

Les rails s'affranchissent à chaud au moyen de scies circulaires. Ces scies ont de 0m,80 à 1m,20 de diamètre et 0m,004 d'épaisseur; elles sont maintenues entre deux plateaux en fonte qui les empêchent de se voiler, et elles trempent dans une bâche remplie d'eau qui évite qu'elles se détrempent trop vite; elles font de 800 à 1000 tours à la minute et coupent un rail en 12 ou 15 secondes. On doit les changer et les visiter toutes les douze heures, et il en faut 3 ou 4 de rechange. Leur usure est de 0m,004 à 0m,005 par jour.

En France, on coupe une extrémité pendant que le rail est chaud; on laisse refroidir, puis on réchauffe l'autre extrémité pour l'affranchir. En Angleterre, on affranchit les deux extrémités à la fois, à l'aide de deux scies placées à une distance convenable, pendant que le rail est chaud; mais on est moins sûr de l'uniformité de longueur des rails refroidis.

Fig. 67.



Les trousses destinées à la fabrication des rails sont généralement composées, comme l'indique la figure 67, de sept assises de barres de fer. La première assise est une seule barre de fer n° 2, destinée à former le champignon supérieur; les cinq assises suivantes sont en fer n° 1, et composées chacune de deux barres de fer ayant, pour les plus grandes trousses, l'une 0m,108 de largeur, et l'autre 0m,054; ces assises sont superposées de manière à faire croiser les joints; enfin l'assise inférieure est en fer n° 2, et composée, comme l'assise supérieure, d'une seule barre si le rail est à double champignon.

La plus grande dimension que l'on donne aux paquets est de 0m,162 de largeur sur une épaisseur à peu près égale.

En moyenne, pour 1000 kilog. de rails reçus, on a 100 kilog. de rails rebuts, 100 kilog. de déchet au four et 125 kilog. de bouts coupés, ce qui fait un total de 1325 kilog. de fer à mettre au four; d'où il s'ensuit que, pour obtenir un rail de 4m,50 de longueur et pesant 30 kilog. le mètre courant, le paquet doit contenir 135 kilog. pour le rail, 17 kilog. pour les bouts coupés et 13 kilog. pour le déchet au four, ce qui fait un total de 165 kilog.

Le rapport que l'on admet entre le poids du fer n° 2 employé et celui du fer brut varie de $\frac{2}{7}=\frac{6}{21}$ à $\frac{1}{3}=\frac{7}{21}$; ainsi le paquet précédent de

165 kilog. serait composé de 55 à 48 kilog. de fer n° 2 et de 110 à 117 kilog. de fer n° 1. La longueur du paquet serait de 1 mètre environ. Pour un rail de 36 kilog., le paquet aurait environ 1m,20 de longueur.

Composition des trousses pour fabriquer le rail Brunel, fig. 65, *à l'usine de Decazeville.*

ASSISES.	ÉPAISSEUR.	1re BARRE.		2e BARRE.		3e BARRE.	
		Nature du fer.	Largeur.	Nature du fer.	Largeur.	Nature du fer.	Largeur.
	mm		mm		mm		mm
1	27.0	Ballé.	189	»	»	»	»
2	22.5	*Id.*	54	Puddlé.	81	Ballé.	54
3	22.5	Fort.	81	Fort.	108	»	»
4	22.5	Puddlé.	108	Puddlé.	81	»	»
5	22.5	*Id.*	54	*Id.*	81	Puddlé.	54
6	21.5	Fort.	81	Fort.	108	»	»
7	12.5	*Id.*	108	*Id.*	81	»	»

Le fer fort est du fer puddlé propre à la fabrication de la tôle. La trousse est ainsi composée de 49 kilog. de fer ballé, 98 kilog. de fer fort, et de 79 kilog. de fer puddlé, total 226 kilog.

A l'usine d'Aubin, pour le même rail, la trousse est composée de 75 kilog. de fer ballé et de 145 kilog. de fer puddlé, total 220 kilog., et elle est formée comme il suit:

ASSISES.	ÉPAISSEUR.	1re BARRE.		2e BARRE.		3e BARRE.	
		Nature du fer.	Largeur.	Nature du fer.	Largeur.	Nature du fer.	Largeur.
	mm		mm		mm		mm
1	27	Ballé.	189	»	»	»	»
2	20	*Id*	54	Puddlé.	81	Ballé.	54
3	20	Puddlé.	81	*Id.*	108	»	»
4	20	*Id.*	108	*Id.*	81	»	»
5	20	*Id.*	81	*Id.*	108	»	»
6	20	*Id.*	108	*Id.*	81	»	»
7	20	*Id.*	81	*Id.*	108	»	»
8	20	*Id.*	108	*Id.*	81	»	»
9	15	Ballé.	189	»	»	»	»

421. *Réception des rails.* Les rails doivent être affranchis à la scie. Les 19/20 doivent être de même longueur, à 1 millimètre près. 1/20 peut être reçu avec une longueur moindre, mais constante, et de 3m,375 ou

de 4 mètres. Cette tolérance est accordée afin de diminuer les déchets; mais les rails ne doivent pas être fabriqués pour cette longueur.

On juge de la qualité du fer par la cassure. Toutefois, comme il serait coûteux de casser un certain nombre de rails, on les essaye de préférence en faisant supporter un poids déterminé à un certain nombre pris au hasard. Il y a quelques années, le cahier des charges pour la fourniture aux chemins de l'État stipulait que les rails à champignon, placés librement sur deux appuis de 0m,08 de largeur chacun et espacés entre eux de 1m,12 de milieu en milieu, devaient pouvoir supporter, dans le milieu de l'intervalle, une charge de 8000 kilog. sans éprouver de flexion apparente. Au chemin de Strasbourg, dans le cahier des charges, on a stipulé que les rails seraient en fer dur et résistant, et qu'ils pourraient être soumis à l'épreuve suivante : placés librement sur deux coussinets distants de 1m,125 d'axe en axe, ils devront supporter dans le milieu un poids de 10000 kilog. sans flexion permanente.

Quelquefois, lorsqu'on a lieu de craindre que le fer ne soit cassant, on fait subir aux rails le choc d'un mouton ou on les laisse tomber d'une certaine hauteur sur des corps durs, de la même manière qu'on essaye les essieux d'artillerie. L'administration des ponts et chaussées n'exige pas l'épreuve par le choc, qui cependant est souvent nécessaire.

On éprouve les essieux d'artillerie, en les faisant reposer sur une table en fonte par les extrémités de leur corps, et en laissant tomber sur leur milieu, d'une hauteur de 1m,60 ou 1m,00, un mouton du poids de 300 kilog., ou encore en les faisant tomber d'une hauteur de 2m,11 sur deux demi-cylindres en fonte sur lesquels ils portent simultanément.

La réception des rails à l'usine se fait tous les huit jours, ou mieux tous les quinze jours, ce qui est plus convenable, surtout quand un même agent est chargé de la réception dans plusieurs usines.

Malgré les essais, le fabricant doit encore garantir ses rails pendant un an de service.

La compagnie du chemin de fer de Strasbourg a eu occasion de se féliciter d'avoir inséré, comme le conseillent MM. Perdonnet et Polonceau, dans le cahier des charges pour les rails et coussinets, un article stipulant que le fabricant ne pourra commencer la fabrication que lorsqu'il aura remis un premier échantillon de sa fabrication à l'ingénieur en chef de la compagnie, et que l'ingénieur en chef, satisfait de cet échantillon, lui aura envoyé par écrit l'autorisation de commencer.

Comme pour les coussinets (415), la compagnie a à l'usine un agent de son choix chargé de la surveillance de la fabrication des rails.

422. *Prix des rails.* Le prix des rails suit le prix des fers, et il est par conséquent très-variable d'un moment à l'autre. Pour les chemins de Saint-Germain, de Versailles et d'Orléans, les rails ont coûté 42 fr. les 100 kilog. rendus à Paris, ce qui répond à 35 fr. pris à l'usine; les nouveaux rails du chemin de fer de Saint-Étienne ont été fabriqués à

l'usine de Terrenoire au prix de 36 fr. 75 c. les 100 kilog., et l'usine reprend les rails usés ou les anciens que l'on remplace au prix de 24 fr. les 100 kilog. Pour le chemin de fer de Versailles à Chartres, un lot de rails a été adjugé à M. Leclerc, de Boistilleul, près Maubeuge, au prix de 344 fr. la tonne. En Belgique, on a payé les rails 25 fr. 90 c. les 100 kilog. pour les chemins de la section d'Ans à la Meuse. En Angleterre, le prix des rails n'est estimé qu'à 16 fr. les 100 kilog.

En France, le fer employé à la construction des machines coûte environ moitié en sus du prix de celui fabriqué en rails.

423. *Pose des rails.* Afin de permettre la dilatation des rails, on laisse entre leurs extrémités un jeu de 4 ou de 2 millimètres, selon que la pose a lieu en hiver ou en été.

La face supérieure du champignon doit être légèrement inclinée vers l'axe de la voie (*fig.* 62, p. 518). En taillant les traverses sous les patins des coussinets on peut obtenir ce résultat.

Dans les courbes, on tient le rail extérieur un peu plus élevé que celui intérieur, afin de contre-balancer l'effet de la force centrifuge. Sur des chemins à grande vitesse, et pour des rayons de 1200 à 1500 mètres, cette différence de niveau se prend égale à $0^m,02$.

Sur les remblais, afin d'obvier au tassement inégal qui a lieu sur la largeur de la voie, on pose le rail voisin de l'entre-voie un peu plus bas que celui du côté du talus; le rail le plus bas se place au niveau général du chemin.

424. *Plaques tournantes.* Les plaques proprement dites, c'est-à-dire les plateaux sur lesquels sont posés les rails, peuvent être en fonte ou en bois. Ces dernières coûtent moins d'établissement; mais elles fonctionnent moins bien et exigent plus d'entretien que les premières; aussi, pour les grandes lignes surtout, convient-il d'adopter les plaques en fonte.

Les plaques peuvent ne porter qu'une voie, ou en porter deux à angle droit. Des plaques placées aux extrémités des gares, où ne passent jamais les convois, peuvent être à une voie; mais celles qui se trouvent sur les parties du chemin où les convois circulent doivent être à deux voies, afin de ne jamais interrompre la ligne.

Le diamètre des plaques varie ordinairement de 4 mètres à $4^m,50$; elles sont supportées par dix ou douze galets de $0^m,30$ à $0^m,40$ de diamètre, avec une largeur de jante de $0^m,07$ environ. Les galets peuvent être fixes et tourner sur leur axe, ou mobiles et rouler entre deux chemins de fer circulaires, fixés l'un à la plaque tournante, l'autre sur le fond de la fosse; on adopte généralement cette dernière disposition, dans laquelle le frottement des axes des galets étant supprimé, ou à peu près, les plaques sont plus faciles à manœuvrer. Les galets mobiles sont maintenus à une distance constante du pivot de la plaque par leurs axes, qui se prolongent jusqu'à ce pivot; deux cercles en fer, l'un à l'intérieur et

l'autre à l'extérieur des galets, ou quelquefois un cercle extérieur seulement, relient les extrémités des axes et maintiennent l'écartement respectif des galets; ces axes sont en fer de 0m,025 environ de diamètre. Pour que les plaques soient bien assises, il convient de placer les galets près de leur pourtour.

La partie de pivot prise dans la crapaudine a de 0m,08 à 0m,10 de diamètre. Il convient que la plaque porte la crapaudine, et que le pivot soit fixé à la plaque de fondation; par là, on n'a pas à craindre que des particules solides viennent s'interposer entre les parties frottantes. Des boulons servent à régler la charge que doit supporter le pivot; la plaque se trouvant ainsi supportée en son milieu et à son pourtour, elle exige moins d'épaisseur que si elle reposait seulement sur les galets.

425. *Plantation de haies de clôture* (Extrait du cahier des charges du chemin de Strasbourg). Les haies seront plantées sur des alignements fixés à l'avance à la distance de 0m,50 des limites de la propriété de l'État, et sur les autres points qui seront indiqués par les agents de la compagnie.

L'entrepreneur fera défoncer à la bêche le terrain destiné à recevoir les plants sur une largeur de 0m,60 à 0m,80, et à une profondeur qui variera, suivant la nature du sol, de 0m,25 à 0m,50. Les mottes seront brisées, et la terre sera ameublie et purgée de pierres et de racines.

La plantation s'effectuera du 1er octobre à la fin de mars. Les plants seront placés sur un seul rang, espacés de 0m,10 au plus, de manière qu'il en entre au moins dix par mètre courant.

Chaque brin offrira une racine chevelue; il sera coupé en bec de flûte à 0m,10 ou 0m,15 du collet de la racine; il aura de 12 à 15 millimètres de circonférence au pied.

Les planteurs apporteront le plus grand soin à recouvrir les racines de terre en les pressant convenablement et sans contrarier leur direction naturelle.

Les haies seront formées d'épines blanches provenant de semis; il sera interdit d'en prendre dans les bois.

On ne choisira que des sujets bien sains, en rejetant ceux dont les racines seraient cassées ou endommagées; ils ne devront pas être âgés de plus de trois ans.

La réception provisoire aura lieu immédiatement après l'achèvement complet des travaux. La réception définitive n'aura lieu que deux années après la plantation, et, à l'époque de la réception définitive, il devra exister par mètre courant au moins dix sujets bien vivants, en pleine vigueur, et répartis de telle sorte qu'il n'y ait pas entre deux plants voisins une distance supérieure à 0m,15.

L'entrepreneur demeurera chargé de l'entretien des haies jusqu'à leur réception définitive.

Il exécutera chaque année : un labour au mois de mars, un binage au mois de mai, un second binage au mois de juillet, et un troisième, s'il en est besoin, au mois de septembre.

Il remplacera en temps convenable les sujets morts. Il recèpera et rafraîchira ceux qui en auront besoin, dirigera les branches vigoureuses et coupera celles qui seront mortes.

Il fera écheniller aux mois de février, mars et mai; recherchera et brûlera attentivement les nids, tissus et bourses de chenilles.

Les haies seront payées au mètre courant. L'entrepreneur recevra un à-compte pour chaque longueur de 10000 mètres de haies qu'il aura plantées. On fera une

retenue de deux dixièmes sur le prix, lesquels seront restitués de la manière suivante :

Un dixième une année après la réception provisoire de la plantation tout entière, et le dernier dixième après la délivrance des certificats de réception définitive.

426. *Fourniture et pose des clôtures en treillage.* (Extrait du cahier des charges du chemin de Strasbourg). Des clôtures en treillage seront établies sur la limite des terrains appartenant à l'État, et sur les autres points qui seront indiqués ultérieurement à l'entrepreneur par les agents de la compagnie.

Ces clôtures se composeront d'un treillage en bois, formé par des lattes verticales reliées entre elles par trois cordons de fil de fer, et fixées sur des cadres formés chacun par deux traverses horizontales et deux poteaux montants.

Les lattes verticales auront $1^{m}.30$ de longueur, 25 à 30 millimètres de largeur et de 9 à 11 millim. d'épaisseur, et elles ne présenteront que des intervalles de 40 à 50 millimètres.

Ces lattes seront appointies à leur partie supérieure ; elles devront être droites et non redressées. Lorsqu'elles seront posées, leur partie inférieure devra se trouver à $0^{m},05$ du sol.

Chaque cordon de fil de fer se composera de deux fils nº 12, qui embrasseront les lattes et qui seront tordus de six à sept fois entre deux lattes consécutives.

La longueur des traverses horizontales sera au moins de $2^{m}.60$; elles auront 30 millim. de largeur et 10 millim. d'épaisseur.

La traverse supérieure sera placée, ainsi que la traverse inférieure, à 10 centim. du bout des lattes.

Ces traverses seront clouées contre les poteaux, de manière à former avec ceux-ci un cadre solide.

Les assemblages des traverses à leur jonction devront être fortement consolidés par des embrasses en fil de fer nº 10, ayant plusieurs tours.

Les poteaux montants seront espacés de $1^{m},30$ d'axe en axe ; ils auront $1^{m},80$ de longueur totale et ils seront enfoncés de $0^{m},40$ à $0^{m},50$ dans le sol.

La section pourra être, au choix de l'entrepreneur, un cercle, un demi-cercle ou un quart de cercle, dont le diamètre devra être respectivement de 8, 9 et 12 centimètres.

Ces poteaux seront droits et enfoncés à la masse. Leurs têtes seront récépées et taillées en pointe après leur enfoncement, et la partie enfoncée en terre sera préalablement durcie au feu.

Le treillage déroulé sera fixé d'abord à chaque poteau montant au moyen de trois clous au moins ; ensuite aux deux traverses horizontales au moyen de cinq attaches sur chaque traverse entre deux poteaux montants. Ces attaches seront en fil de fer nº 10. Le nœud en sera serré et aura plus d'un tour.

Les lattes, traverses et poteaux seront en bois de chêne, de châtaignier ou d'acacia, au choix de l'entrepreneur.

Les lattes et traverses seront prises dans le cœur du bois fendu et bien de fil.

Les bois pour poteaux seront sans écorce.

La réception provisoire aura lieu après l'achèvement complet des travaux, et la réception définitive après l'expiration d'une année de garantie, pendant laquelle l'entrepreneur devra pourvoir aux réparations et remplacements qui seraient suscités par la malfaçon ou la mauvaise qualité du bois ; les travaux qui proviendraient de causes étrangères lui seraient payés.

Les clôtures seront payées au mètre courant. L'entrepreneur recevra un à-compte par chaque longueur de 10 000 mètres de clôture posée, avec retenue de deux dixièmes de garantie, qui seront payés : un dixième dans le mois qui suivra l'achèvement des travaux et la réception provisoire, et le dernier dixième immédiatement après la réception définitive, à l'expiration de l'année de garantie.

427. *Chemins de fer à deux ou à une seule voie.* Pour une circulation

de 500000 tonnes de marchandises et 1 000000 de voyageurs par an, on établit un chemin à deux voies: lorsque la circulation ne dépasse pas 200 000 tonnes de marchandises et 400000 voyageurs, le chemin peut être à une seule voie.

Pour un chemin à une seule voie, on achète les terrains pour deux voies, qui peuvent devenir nécessaires par la suite. Les travaux d'art s'exécutent pour recevoir deux voies; il n'y a que les tranchées que l'on n'établit que pour une voie.

La grande ligne de Bordeaux à Cette sera à une seule voie, avec des gares d'évitement en nombre suffisant.

WAGONS.

428. *Wagons de terrassement.* Ils sont portés sur quatre roues; les roues sont fixées aux essieux, qui tournent dans des boîtes entièrement en fonte.

Ces wagons doivent être d'une construction simple et d'une solidité en rapport au temps pendant lequel ils doivent servir et au service auquel on les destine. Leur hauteur ne doit pas dépasser $1^m,60$, afin qu'un homme de moyenne taille puisse les charger facilement; elle était de $1^m,53$ au chemin de Versailles (rive gauche), et de $1^m,55$ au chemin de Saint-Germain. Le poids doit, autant que possible, être réparti uniformément sur les quatre roues.

La caisse est mobile autour d'un axe qui lui permet de verser par une extrémité du wagon ou sur le côté, et quelquefois à volonté sur le devant ou sur le côté. Elle charge d'environ 30 kilog. moins du côté qu'elle se renverse que de l'autre, afin qu'elle n'oscille pas d'une manière continue et ne se renverse qu'à la volonté des conducteurs. Leur angle de versement ne doit pas être de moins de 40 à 45°; il convient que les terres les plus adhérentes, les terres argileuses ou humides, se détachent sans trop de difficulté de la caisse renversée. La forme trapézoïdale que l'on donne horizontalement à la caisse et l'inclinaison de ses parois latérales facilitent encore le déchargement. Il convient aussi que les terres tombent à une certaine distance de la caisse. Sur le chemin de Versailles (rive gauche), les caisses avaient $0^m,39$ de profondeur, $2^m,26$ de longueur en haut sur $2^m,06$ au fond, et $2^m,10$ de largeur en haut sur $1^m,90$ au fond.

Le fond de la caisse doit être très-épais; on le fait en sapin ou en peuplier; les parois latérales se font en chêne ou en sapin.

Toutes les ferrures doivent être bien proportionnées et en fer de bonne qualité.

Les essieux doivent être en fer de première qualité, et leurs fusées seules sont tournées. Dans les wagons anglais, les fusées sont placées en

dedans des roues; dans les wagons français, elles sont placées en dehors, ce qui permet, pour un même diamètre de roues, de diminuer celui des essieux. Aux chemins de Versailles (rive gauche) et de Saint Germain, le diamètre de l'essieu était de 0m,085 entre les roues, de 0m,076 aux points de calage des roues, et de 0m,05 aux fusées; la longueur de l'essieu, entre les deux fusées, était de 1m,72.

Les roues sont en fonte, d'une seule pièce; elles sont coulées en coquille, afin de tremper en quelque sorte le pourtour de la jante. Le moyeu porte des fentes qui le divisent en autant de secteurs qu'il y a de bras; par cette précaution, le retrait se fait facilement dans toutes les parties de la roue. Ces fentes se remplissent avec des cales en fer, après avoir cerclé le moyeu avec deux frettes en fer posées à chaud.

Les roues doivent avoir un diamètre suffisant pour franchir sans difficulté les pierres ou autres obstacles qui peuvent se trouver sur la voie pendant les terrassements, et pour que les wagons ne soient pas trop difficiles à mettre en mouvement. En France, les roues ont 0m,50 de diamètre; en Angleterre, elles ont 0m,75. Avec ces dernières, il est impossible d'obtenir une hauteur de wagon et un angle de versement de caisse convenables; elles sont plus coûteuses que celles de 0m,50, et elles ne peuvent pas non plus servir pour les wagons de marchandises après l'exécution de la voie, les roues de ces wagons ayant de 0m,90 à 1m,00 de diamètre; tout ce qu'on pourrait faire serait de les utiliser pour le transport de la houille, et encore faudrait-il les cercler en fer si l'on voulait marcher à de grandes vitesses; du reste, les roues sont entièrement usées après quelque temps de service aux terrassements. Aux chemins de Versailles (rive gauche) et de Saint-Germain, le diamètre des roues était de 0m,50, et la largeur de la jante, y compris le rebord, était de 0m,12.

Au chemin de Versailles (rive gauche), les wagons versant devant ont coûté 640 fr. 65 c., et ceux versant de côté, 664 fr. 80 c.; ces wagons étant traînés par des locomotives, et marchant à une grande vitesse, ils étaient d'une construction solide; cependant aujourd'hui on pourrait les établir à meilleur marché. D'après MM. Perdonnet et Polonceau, des wagons traînés par des chevaux ne doivent pas coûter plus de 300 à 400 fr. Les wagons employés sur le chemin de fer de Lille à la frontière belge ont coûté 450 fr.; ils pouvaient contenir 1mc,60 de terre; ils étaient destinés à descendre sur un plan incliné de 0m,015, ou à être remorqués par des chevaux.

Dans ces derniers temps, on a construit, pour de grands terrassements, des wagons contenant 9 mètres cubes; on les charge et décharge à la pelle; des wagons ordinaires amènent auprès les terres prises dans les différents points de la tranchée.

429. *Wagons de service et voitures pour les voyageurs.* Les boîtes à graisse sont en fonte, mais toujours munies de coussinets en bronze ou

en métal blanc (431). La caisse est toujours montée sur ressorts; elle est supportée par les extrémités de ces ressorts, dont le milieu repose sur la boîte à graisse. Celle-ci est prise entre les deux branches d'une plaque en fer ou en forte tôle, dite *plaque de garde*, qui est solidement fixée au châssis du wagon et maintient invariable l'écartement des essieux.

Les voitures, à part quelques exceptions concernant les wagons destinés au transport des marchandises, portent des ressorts qui amortissent les chocs ou les secousses des différentes voitures d'un convoi les unes contre les autres ou contre les obstacles qu'elles peuvent heurter.

Quelques ingénieurs préfèrent, pour les convois à grande vitesse, les voitures à 6 roues. Le mouvement de lacet étant moins grand qu'avec les voitures à 4 roues, elles sont moins sujettes à dérailler, et la caisse, en cas de rupture d'un essieu, est soutenue par les deux autres.

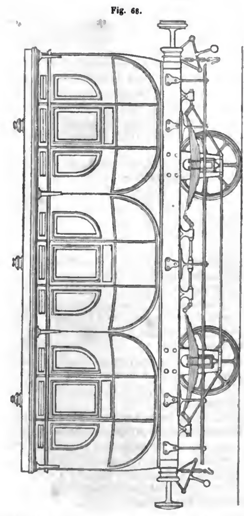
En France, on a adopté des voitures à 6 roues pour les chemins de Paris à Lyon et d'Avignon à Marseille. On a conservé celles à 4 roues pour les chemins du Nord et de Strasbourg (433).

En Angleterre, les voitures de voyageurs sont en général à 4 roues et à 3 compartiments. Sur les chemins où l'on a fait primitivement usage de voitures à 6 roues, on a supprimé l'essieu du milieu. On trouve les voitures à 4 roues plus stables et plus sûres, surtout depuis qu'on fabrique des essieux assez forts et d'assez bonne qualité pour qu'ils ne cassent plus.

Sur le chemin de fer de South-Eastern, on a mis en service des voitures à 8 roues; l'expérience ne leur a pas été favorable.

La fig. 68 représente, à l'échelle de 1/30, l'élévation d'une voiture de première classe du chemin du Nord.

Fig. 68.



430. *Poids des voitures. Chargement.* Les voitures du chemin de fer du Nord sont d'un poids considérable. Le tableau suivant donne les poids, roues et essieux compris, des différentes voitures de ce chemin.

		kilog.
Voitures à voyageurs.	1re classe.	5240
	2e classe.	5000
	2e à frein.	5300
	3e classe.	4760
	3e à frein.	5113
Trucks	à équipages. . .	3620
	à diligences. . .	1240

Le chargement le plus habituel d'un wagon à 4 roues, sur les voies larges aussi bien que sur les voies étroites, ne dépasse pas 6 tonnes de marchandises, eu égard aux usages et aux besoins du commerce, et aussi pour la conservation des rails.

Sur les embranchements de peu de longueur, il est rare que les wagons de marchandises portent un poids supérieur à 3 tonnes.

Depuis que l'on fabrique des essieux plus résistants, on a augmenté les chargements, que l'on peut porter à 4 ou 5 tonnes par essieu pour les voies à rails de fortes dimensions et tracées avec des courbes d'assez grand rayon. Au chemin du Nord les nouveaux wagons à 4 roues, pour le transport de la houille, se chargent de 10 tonnes, non compris 3 1/2 à 4 tonnes de poids mort. Les fusées ont 0m,08 de diamètre et 0m,17 de longueur.

Les entreprises de messageries transportent les voyageurs dans des caisses seulement liées sur un train par des courroies. Ce mode de transport n'est pas sans danger en cas de choc ou de tout changement brusque de vitesse.

431. *Essieux et roues.* Les essieux doivent être exempts d'angles rentrants vifs; les parties de différents diamètres doivent être raccordées par des congés arrondis. Comme on a remarqué que l'altération des essieux brisés est moins sensible dans le voisinage des clavettes que dans les parties qui en sont éloignées, sur quelques chemins on cale les roues sur les essieux au moyen de trois clavettes, quoique une puisse suffire.

Les fusées des essieux sont presque toujours placées en dehors des roues, ce qui permet d'en réduire le diamètre et par suite la résistance due à leur frottement. Il est bon de les tenir un peu fortes, afin de pouvoir, au besoin, les remettre sur le tour. On a remarqué que les coussinets s'usaient moins rapidement lorsqu'on donnait une grande hauteur aux collets des fusées, et qu'on en rendait la face intérieure plane.

Au chemin de fer de Strasbourg à Bâle, les fusées ont 0m,065 de diamètre, et on ne leur donne pas au delà de 0m,10 de longueur, à moins que des dispositions particulières ne l'exigent. Aux chemins de fer de Versailles (rive droite) et de Saint-Germain, les roues ayant 1 mètre de diamètre, les essieux ont 0m,075 de diamètre, 0m,09 à l'endroit du calage des roues et 0m,06 à 0m,065 environ aux fusées; la longueur des fusées entre les collets est de 0m,08 environ.

Pour les grandes lignes, sur lesquelles les arrêts sont moins fréquents et la vitesse plus grande, on a été amené à augmenter les dimensions des fusées, qui s'échauffaient rapidement sous la charge qu'elles avaient à supporter et qui a toujours été en augmentant.

Au chemin de Lyon, les anciennes fusées avaient 0m,065 de diamètre et 0m,127 de longueur; les nouvelles ont 0m,075 de diamètre et 0m,160 de longueur. On a reconnu que sous la charge de 1540 kil. pour les voitures à voyageurs et de 1900 kil. pour les wagons à marchandises, ce qui correspond à 18 et 23 kilog. par centimètre carré de la projection $12,7 \times 6,5 = 82^{c.q.},55$ de la fusée, les fusées s'échauffaient un peu, mais sans cesser de donner une bonne marche.

Les essieux du chemin de fer de Strasbourg à Bâle sont fabriqués en corroyant sept barres de fer plat de 0m,13 de largeur sur 0m,027 d'épaisseur; les essieux sont amenés, toujours au marteau et sans faire usage de l'étampe, aux dimensions qu'il convient de leur donner pour les mettre sur le tour; c'est généralement à cet état que les forges les livrent aux administrations des chemins de fer. Le fer employé à la fabrication des essieux doit avoir été préparé au charbon de bois et forgé au marteau.

Fig. 69.



On fabrique en Angleterre d'excellents essieux au moyen de trousses ou paquets, dont le bout est représenté fig. 69. Une barre ronde *b*, en fer de qualité supérieure, est placée au centre; d'autres, *c*, qui l'entourent, ont la forme de voussoirs, et le tout est maintenu par deux petits cercles placés aux extrémités de la trousse. Ainsi composée, la trousse est chauffée au blanc dans un four à réverbère, puis passée au laminoir. Elle est ensuite martelée. On en coupe les extrémités à la scie circulaire, et des bouts qu'on en retire on fabrique au laminoir des barres rondes qui servent pour d'autres trousses.

Les essieux de grandes dimensions sont soudés à l'aide d'un marteau qui pèse de 4 à 5 tonnes. Deux chaudes suantes suffisent pour souder dans toute sa longueur un essieu semblable à ceux dont on se sert sur le chemin de Bristol, à voie de 7 pieds. Il faut ensuite deux autres chaudes modérées pour terminer l'essieu.

Le fer qui compose les essieux formés de cette manière est entièrement nerveux. On peut faire à froid, avec les barres, le premier passage d'un nœud ordinaire sans qu'il se manifeste la moindre altération à la surface. Ces essieux se vendent 95 fr. le quintal métrique pris à l'usine.

Le métal blanc, dit *anti-friction*, est assez généralement préféré en Angleterre pour les coussinets de boîtes à graisse. En France, au contraire, on y a renoncé. On a aussi essayé de l'employer comme doublure intérieure de coussinets en bronze ou en fonte, mais ces coussinets mixtes, de même que les précédents n'ont pu résister aux fortes charges à grande vitesse.

Il est probable que le métal employé en France est de moins bonne qualité que celui dont on se sert en Angleterre.

Sur le chemin de fer dit South-Western, en Angleterre, on intercale avec avantage des bandes de cuir le long des rainures de la boîte à graisse, entre lesquelles frotte la plaque de garde.

Le prix courant des boîtes à graisse du poids total de $19^{k},07$, avec coussinets en bronze, est de 17 fr.

Les roues ont de $0^{m},90$ à 1 mètre de diamètre. Deux roues montées sur le même essieu doivent avoir le même diamètre; on ne doit tolérer pendant la marche qu'une différence de $0^{m},001$, car autrement, à cause de la fixité des roues sur l'essieu, une des roues produirait un frottement de glissement considérable sur le rail.

Aux chemins de Versailles (rive droite) et de Saint-Germain, des roues ayant 1 mètre de diamètre ont $0^{m},12$ de largeur de jante, y compris le rebord. Dans les anciennes roues anglaises, la largeur de la jante n'était que de $0^{m},10$; mais dans les nouveaux modèles, on l'a portée à $0^{m},13$, afin de diminuer le frottement du rebord de la roue contre le

rail; c'est la largeur adoptée sur plusieurs grandes lignes françaises.

Les rais, ainsi que la partie du pourtour de la roue à laquelle est fixé le rebord, sont le plus souvent en fer malléable; quelquefois cependant, mais pour le transport des marchandises seulement, ils sont coulés avec le moyeu, comme pour les wagons de terrassement (428).

La conicité donnée au pourtour de la jante dépend du rayon des courbes qui se trouvent sur le chemin et de la vitesse de circulation. Sur le chemin de Londres à Birmingham, pour un rayon de au moins 1000 mètres, à l'exception d'une courbe qui est d'un rayon plus petit, l'inclinaison du bandage est de 1/15; sur le chemin de Versailles (rive gauche), le rayon minimum étant de 1200 mètres, cette inclinaison est de 1/12; et sur le chemin de Bâle à Strasbourg, où les courbes sont en petit nombre et d'un très-grand rayon, cette inclinaison est de 1/25. Pour les voitures, les bandages doivent avoir, à l'état brut, 0m,035 à 0m,040 d'épaisseur dans la partie la plus mince, et pour les locomotives 0m,045 à 0m,050. Dans ces derniers temps ces épaisseurs ont encore été augmentées.

Le rebord de la jante doit être fort et calculé de manière qu'il soit usé en même temps que la jante, avec laquelle il se raccorde par un congé très-allongé; le rebord doit être d'autant plus fort qu'il y a plus de courbes sur le chemin et que les rayons de ces courbes sont plus petits. Comme la jante se creuse au milieu, il convient de ménager un chanfrein de 0m,01 de largeur sur tout son pourtour extérieur ou d'augmenter l'inclinaison du bandage vers l'extérieur (le rebord est à l'intérieur de la voie.)

Le bandage se compose quelquefois de deux cercles superposés, un qui s'appuie sur les rails et un autre qui porte le rebord. Sur tous les chemins anglais, sur les chemins belges et sur celui de Strasbourg à Bâle, le bandage est un seul cercle qui porte le rebord.

Les bandages de roues s'usent rapidement, et il est très-difficile de s'en procurer de bonne qualité.

On a fabriqué dans les usines françaises, notamment à Hayange, des bandages composés de deux espèces de fer pour ainsi dire soudées ensemble: l'une, nerveuse, qui doit être placée vers l'intérieur de la roue; l'autre, grenue, qui doit former la partie extérieure du bandage. L'épaisseur du nerf est de un tiers à moitié de celle du grain.

Les bandages le plus généralement employés en Angleterre sont à cassure homogène, d'un grain fin, aciéreux, bleuâtre. On les fabrique, pour la plus grande partie, dans les usines du Yorkshire, à Lowmoor et Bowling.

Les bandages anglais sont très-tenaces; les bandages français le sont moins. Les premiers paraissent avoir plus de durée que ces derniers.

Sur quelques chemins anglais, celui de Bristol entre autres, les bandages sont en acier. Ils font un bon service, mais ils sont coûteux et

sujets à se rompre ; de plus, leur élasticité les fait se redresser en cas de rupture.

En Angleterre on soumet quelquefois les bandages à un laminage supplémentaire, ce qui leur donne les avantages et les inconvénients des bandages en acier.

Des bandages de cette espèce, après avoir parcouru 32000 kilomètres, n'avaient perdu que 5 livres en poids, tandis que les bandages ordinaires perdent 15 livres.

Les rais sont en fer plat de 0^m,08 à 0^m,09 de largeur sur 0^m,010 à 0^m,015 d'épaisseur, employé de manière à former ordinairement des triangles dont les sommets se logent dans le moyeu, et dont les bases s'appuient contre la jante ; quelquefois les trois côtés de ces triangles sont curvilignes, ce qui augmente l'élasticité ; d'autres fois la base seule est courbe. Les cercles doivent être tournés à l'intérieur comme à l'extérieur ; autrement il n'y aurait contact qu'en quelques points, et les roues se déformeraient ; il convient même de préparer à la grosse lime la face des rais qui repose sur le cercle. Les bandes à rebord sont fixées au pourtour de la roue par des rivets coniques qui traversent tout le bandage. On a fait usage pour les roues de machines et tenders sans faux-bandages, de vis qui ne pénétraient que jusqu'aux deux tiers de la profondeur du bandage ; mais ces vis se desserraient, et on leur a substitué des boulons qu'on rive légèrement sur leurs écrous.

Une roue bien faite, lorsqu'on la frappe sur les rais avec une baguette en fer, rend un son vibrant, analogue à celui d'une cloche.

M. Booth fait un grand éloge de roues dont le moyeu est en fonte ; les rais en bois et les cercles en fer de Lowmoor.

Chemin de Strasbourg. (Extrait du cahier des charges.)
Les dimensions suivantes seront rigoureusement suivies sans tolérance :

Diamètre de l'essieu au calage.	0^m,110
Écartement des bandages des roues.	1 ,362
Distance d'axe en axe des fusées.	1 ,907
Diamètre des fusées.	0 ,065
Longueur des fusées.	0 ,127
Inclinaison de la surface des bandages.	1/20
Largeur des entailles des clefs.	0 ,025
Épaisseur des clefs en acier.	0 ,015

L'épaisseur des bandages devra être de 0^m,04 au moins. Au milieu, cette épaisseur pourra être plus forte, pourvu que le profil extérieur s'accorde avec le gabarit, et que les deux roues montées sur le même essieu aient rigoureusement le même diamètre.

Il sera remis au fournisseur un gabarit pour la section des bandages des roues, et un autre pour vérifier les fusées des essieux, leur écartement, etc.

Le trou des moyeux de chaque roue sera alésé tellement juste qu'il pourra s'adapter indistinctement à tous les essieux, et son frottement sera tellement dur, qu'il ne pourra ni s'y placer, ni en être retiré qu'à l'aide d'une puissante presse mécanique ou hydraulique quelconque.

Les essieux seront tournés sur toute leur longueur. Les parties coniques et les parties cylindriques du milieu de l'essieu seront dégrossies au tour. La position et la dimension des fusées et des parties porte-roues devront être parfaitement identiques, sans tolérance. Les entailles des clefs seront parfaitement alignées et parallèles à l'axe de l'essieu.

Les bandages seront tournés sur toutes leurs faces.

Les clefs en acier seront exactement calibrées, et leurs entailles sur l'essieu seront parfaitement dressées, de manière que les clefs portent d'un bout à l'autre sur toutes leurs faces.

Les essieux seront en fer purement au bois de première qualité, corroyé au marteau, et provenant de fonte au bois pur. Ils peuvent être soumis aux épreuves adoptées pour les essieux de l'artillerie (421).

Chaque essieu sera forgé avec un excédant de longueur de 5 à 6 centimètres à chaque bout. Cet excédant, après avoir été réduit sur le tour au diamètre d'environ 30 à 35 millimètres, sera rogné de la manière qui sera indiquée par l'agent de la compagnie chargé de suivre la fabrication.

Tout essieu dont la fracture, à ses deux extrémités, n'annoncerait pas un fer nerveux et bien soudé, pourra être refusé.

Les fragments, marqués au nom du fabricant et au numéro de l'essieu dont ils proviennent, seront conservés par la compagnie comme pièces justificatives de la qualité des fers employés.

Nous extrayons les quelques chiffres suivants, relatifs au chemin de fer du Nord, d'un mémoire publié par M. Nozo, ingénieur des ateliers de ce chemin, dans le bulletin de la Société centrale des ingénieurs civils.

Au chemin de fer du Nord, il faut retourner environ 7500 à 8000 paires de roues montées, et fabriquer et poser 1900 à 2000 bandages par année.

L'expérience a démontré que les roues sans faux cercle résistent moins bien et sont d'un entretien plus coûteux que celles à faux cercle.

Les premières fusées des essieux montés des wagons avaient 0m,060 de diamètre et 0m,127 de longueur; mais l'expérience a prouvé que pour de longs parcours et de grandes vitesses, des fusées aussi petites s'échauffent, et on a porté leur diamètre à 0m,075 et leur longueur à 0m,200. Les premières étaient remplacées par ces dernières dès qu'elles pénétraient dans une jauge de 0m,057 de diamètre.

Les fusées de tenders avaient, à l'origine de l'exploitation, 0m,080 de diamètre et 0m,180 de longueur. Dès que ces fusées pénétrent dans un calibre jauge de 0m,076 de diamètre, les essieux sont remplacés par d'autres dont les fusées ont 0m,095 de diamètre et 0m,190 de longueur.

Pour les essieux montés de supports des machines système Stéphenson, les fusées, qui sont intérieures, avaient primitivement 0m,140 de diamètre et 0m,160 de longueur; on leur a conservé le même diamètre, mais on a porté leur longueur à 0m,170. Quant aux essieux moteurs, on a donné aux fusées, qui sont également intérieures, 0m,160 de diamètre et 0m,150 de longueur.

Pour les machines à grande vitesse, système Crampton, les fusées, qui sont extérieures, des essieux d'avant ont 0m,150 de diamètre et 0m,300 de longueur; celles de l'essieu du milieu, qui sont extérieures aussi, ont 0m,130 de diamètre sur 0m,252 de longueur, et celles des essieux moteurs, qui sont intérieures, ont 0m,180 de diamètre sur 0m,260 de longueur.

Les bandages sont généralement maintenus en service tant qu'ils conservent d'épaisseur, après dernier rafraîchissage au tour, 0m,030 pour roues motrices, 0m,025 pour roues de support et tenders, et 0m,020 pour roues de voitures et wagons.

La plupart des bandages arrivent à ces épaisseurs limites après trois rafraîchissages pour les machines ou tenders, et quatre pour les wagons.

Le parcours moyen des bandages, depuis la mise en service jusqu'à la mise au rebut, est approximativement :

Bandages de voitures et wagons.	50 000 kilom.
Id. de roues de support.	50 000
Id. de roues motrices	45 000
Id. de roues de tender.	35 000

L'épaisseur du bandage a été portée à 0m,055 pour toutes les roues, wagons et locomotives; la largeur totale du bandage est 0m,130 pour les wagons et 0m,140 pour les locomotives; l'inclinaison de la surface est de 1/20, et depuis environ l'aplomb de la face extérieure du rail, c'est-à-dire sur à peu près 0m,035, cette inclinaison est de 3/20.

432. *Châssis de voitures à voyageurs de* 1re, 2e et 3e *classe.* (Extrait du cahier des charges du chemin de fer de Strasbourg.)

Chaque châssis devra pouvoir s'ajuster indistinctement sur tous les essieux, et recevoir, sans aucune modification, toutes les caisses de voitures de la même classe.

8 boulons, dont la position sera rigoureusement fixée à l'aide d'un gabarit en fer, d'après les indications des ingénieurs, fixeront la caisse au châssis.

Le châssis se compose d'un cadre en charpente formé de deux brancards de 0m,25 sur 0m,11, reliés par 5 traverses de 0m,25 sur 0m,10, et par un système de croix de Saint-André, dont la face supérieure affleure la face supérieure des brancards.

Les plaques de garde seront fixées à l'intérieur des brancards par 4 boulons chacune, dans une entaille d'un centimètre de profondeur.

Tous les boulons seront goupillés afin d'empêcher les écrous de se desserrer.

Les ressorts seront en acier à ressorts de première qualité, lames étirées et assemblées *sans séparation entre elles;* chaque lame sera reliée à sa voisine par des étoquiaux. Ils seront reliés au châssis par des mains en cuir et par des vis de rappel traversant des supports en fer forgé invariablement fixés aux brancards (fig. 98).

433. *Caisses.* Sur le chemin de Paris à Strasbourg, les caisses des voitures de 2e classe ont 1m,58 de longueur, tandis que celles du Nord n'ont que 1m,48.

Sur le chemin de Lyon, les voitures sont à 6 roues, comme au

chemin d'Avignon à Marseille, et les caisses des voitures de 2e classe ont 1m,64 de longueur (429).

Au chemin de fer du Nord, dans les voitures de 3e classe, une banquette règne sur tout le pourtour de la voiture, et il y a en outre au milieu deux banquettes placées en long comme dans les omnibus. Le public ne peut entrer ou sortir que par deux portières de chaque côté, ce qui est insuffisant.

***TABLEAU** des principales dimensions intérieures des caisses de voitures à voyageurs, sur d'anciennes et de nouvelles lignes.*

CHEMINS.	1re CLASSE.			2e CLASSE.			3e CLASSE.		
	Longueur.	Largeur.	Hauteur.	Longueur.	Largeur.	Hauteur.	Longueur.	Largeur.	Hauteur.
	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
Paris à Strasbourg. .	1.74	2.26	1.75	1.58	2.26	1.75	1.33	2.28	1.70
Nord.	1.80	2.40	1.75	1.46	2.26	1.75	Omnibus.		
Amiens à Boulogne. .	1.80	2 40	1.75	1.76	2.26	1.75	1.32	2.26	1.75
Paris à Lyon.	1.75	2.40	1.75	1.84	»	1.75			
Paris à Orléans (dernier modèle). . . .	1.70	2.40	1.38	1.55	2.26	1.55			
Paris à Rouen. . . .	1.60	2.10	1.45	1.50	2.26	1.56	1.50	2.29	décou.

(*Extrait du cahier des charges du chemin de fer de Strasbourg.*) Les caisses des voitures à voyageurs seront rigoureusement conformes aux plans d'ensemble remis aux fournisseurs, revêtus de la signature des administrateurs et joints au traité.

Chaque caisse devra s'ajuster indistinctement sur tous les châssis de voitures de la même classe.

Les bois employés seront de premier choix, sans nœuds vicieux, roulures, malandres, fils tranchés, ou autres défauts; ils auront au moins 3 années de coupe; dont un an au moins de débit en plateaux; dans cet état de sécheresse, et 3 mois avant la construction des caisses, ces plateaux seront réduits en dimensions voulues, suivant les plans de la compagnie.

Les brancards seront en chêne; les battants des pavillons, les pieds et les travaux de toute espèce seront en chêne ou en frêne; on ne fera usage de l'orme ou du hêtre que pour les petites traverses de remplissage; les baguettes seront en noyer.

Les châssis à glaces, les ventilateurs et la frise intérieure seront en acajou. Ces châssis devront tous avoir exactement les mêmes dimensions, afin de pouvoir servir indistinctement à toutes les voitures d'une même classe; il en sera de même de toutes les pièces mobiles des diverses caisses.

Les panneaux extérieurs seront en tôle forte de première qualité, pesant 7k,25 le mètre carré, bien planée, de manière à présenter une surface parfaitement unie.

Tous les pavillons seront couverts en feuilles de zinc n° 14, de la meilleure qualité. Les gouttières seront en cuivre, s'engageant sous le zinc et se reliant à des corniches.

Il sera ménagé dans les pavillons de 1re classe, et au milieu de chaque compartiment, une ouverture pour recevoir une lampe d'intérieur.

Toutes les ferrures seront faites en fer au bois de la meilleure qualité, ou en fers corroyés dont la qualité aura été constatée et approuvée par les ingénieurs de la compagnie. Elles seront travaillées et parées avec soin, sans brûler, suivant les règles de l'art.

La peinture sera faite avec les plus grands soins et avec des couleurs de qualité supérieure; on emploiera, pour les premières couches, du vernis de première qualité, et pour la dernière, du vernis anglais pur.

Pour les voitures de 1re classe, la peinture sera faite conformément au détail suivant :

Deux couches d'impression à la céruse;
Six couches d'apprêts pour poncer;
Poncer à l'eau jusqu'à l'impression;
Une couche de céruse, teintée selon la couleur des fonds;
Mastiquer au vernis et poncer;
Une seconde couche de céruse;
Remastiquer et poncer;
Deux couches de fond;
Un glacis au vernis;
Une couche de vernis et polir;
Une couche de vernis, polir à fond;
Dorer, réchampir et filer;
Vernir au vernis anglais;
Les panneaux noirs, après avoir été apprêtés, recevront quatre couches, dont la première de noir de fumée, la deuxième de noir d'ivoire, les deux dernières de noir du Japon;
Tous les bois intérieurs, non apparents, recevront une couche à l'huile.

Toute la garniture sera rembourrée de crin blond de la plus belle qualité. Le drap sera doublé de toile, pour empêcher le crin de sortir.

Conditions applicables aux caisses de 2e classe. Les voitures de 2e classe seront divisées en 3 caisses, dont chacune sera desservie par deux portières et pourra contenir 10 voyageurs.

Il sera ménagé aux deux cloisons une ouverture pour recevoir une lampe d'intérieur.

Les caisses seront garnies en fort coutil de fil rayé.

La rembourrure sera faite en deux couches : la première de filasse, l'autre de crin.

Par voiture on emploiera 60 kilog. de filasse et 30 kilog. de crin de bonne qualité.

La peinture sera faite de la manière suivante :

Une couche d'impression à la céruse;
Six couches d'apprêts;
Poncer à l'eau jusqu'à l'impression;
Mastiquer au vernis, poncer les mastics et reboucher au mastic à l'huile;
Trois couches de teinte;
Une couche de vernis gras à polir;
Réchampir et filer;
Vernir une deuxième fois au vernis anglais pur;
Les panneaux noirs, après avoir été apprêtés, recevront trois couches, dont une de noir d'ivoire, et le vernis anglais;
Toutes les parties intérieures seront peintes de trois couches de couleur bois à l'huile, et rebouchées avec soin;
Tous les bois intérieurs, avant d'être recouverts par la garniture, seront peints d'une couche à l'huile;
Les châssis vitrés seront peints de trois couches à l'huile, polis et vernis.

Conditions applicables aux voitures de 3e classe. Les voitures de 3e classe seront divisées en 4 caisses, dont chacune pourra contenir 10 voyageurs et sera desservie par deux portières.

Les voitures seront couvertes, et fermées latéralement par des rideaux.

Il n'y aura pas de garniture intérieure.

La peinture sera faite conformément au modèle suivant :

Une couche d'impression à la céruse ;
Cinq couches d'apprêts ;
Poncer à l'eau jusqu'à l'impression, et passer une couche de céruse grise;
Mastiquer au vernis, poncer les mastics et reboucher au mastic à l'huile ;
Deux couches de teinte ;
Une couche de vernis gras et polir ;
Réchampir et filer ;
Vernir une dernière fois au vernis anglais pur ;
Les panneaux noirs, après avoir été apprêtés, recevront deux couches, dont une de noir d'ivoire, et le vernis anglais ; .
Tout l'intérieur de la caisse, y compris les banquettes, sera peint de trois couches à l'huile, de couleur bois, et rebouché avec soin.

Les caisses seront livrées montées sur leurs châssis garnis des roues et essieux ; le tout complet, peint et prêt à fonctionner.

Les frais de transport et autres, s'il y en a, jusqu'à la livraison, seront à la charge du fournisseur.

La compagnie se réserve le droit de faire suivre la construction par ses ingénieurs.

Le prix de chaque caisse complète sera payé, savoir : neuf dixièmes après sa réception, et un dixième après le délai de garantie.

En Angleterre on fait un assez grand usage du *papier mâché* pour les panneaux des voitures de voyageurs et le doublage intérieur des caisses. Pour les wagons à marchandises construits en bois de chêne, on se contente souvent d'une peinture à l'huile bouillante, qui paraît préférable à la peinture ordinaire.

RÉSISTANCES AU MOUVEMENT DES WAGONS.

434. *Résistance due au frottement des essieux.* La résistance que ce frottement oppose directement à la marche d'un wagon est exprimée par

$$R_1 = Pf\frac{d}{D}. \qquad (442)$$

R_1 résistance que le frottement des essieux oppose directement à la traction qui sollicite le wagon ;
P pression des fusées sur les boîtes ;
$f=0.05$ coefficient du frottement des essieux dans leurs boîtes, le graissage se faisant très bien et d'une manière continue (62) ;
d diamètre des fusées des essieux ;
D diamètre des roues ;

Le rapport $\frac{d}{D}$ varie de 1/12 à 1/20; il est généralement de 1/14 environ pour les wagons de service et les voitures pour voyageurs (431).

435. *Résistance due au frottement qui s'exerce au pourtour des roues.* Cette résistance étant représentée par R_2, on a

$$R_2 = (P + p) f'. \qquad (442)$$

P polds qui repose sur les roues;
p poids des roues et essieux;
$(P+p)$ poids total du wagon (430);
$f' = 0.00125$ à 0.001 coefficient du frottement de roulement des roues sur les rails (59 et 443).

436. *Résistance que l'air oppose au mouvement des wagons.* Des expériences faites à Brest par M. Thibault, lieutenant de vaisseau, il résulte que la résistance de l'air contre la base d'un prisme droit à base carrée, dont les arêtes latérales sont placées dans la direction du mouvement, est exprimée par

$$R_3 = \theta \varepsilon A V^2. \qquad (a)$$

R_3 résistance que l'air oppose au mouvement du prisme, en kilogrammes;
$\theta = 0.0625$ coefficient constant;
ε coefficient qui dépend du rapport de la longueur du prisme au côté de sa base :
Si la longueur du prisme est égale à trois fois le côté de la base. $\varepsilon = 1.10$
Si elle lui est égale, c'est-à-dire si le solide est un cube. . . . $\varepsilon = 1.17$
Si elle est beaucoup plus petite (plaque mince). . . . . $\varepsilon = 1.43$
A base du prisme en mètres carrés;
V vitesse du prisme par rapport à l'air, en mètres par seconde.

Des expériences de M. Thibault, il résulte aussi qu'en plaçant deux surfaces carrées, se masquant exactement, l'une derrière l'autre, la résistance de l'air contre la seconde surface est nulle quand celle-ci n'est séparée de la première que d'un très-petit espace, et qu'elle est les $\frac{7}{10}$ de celle contre la première quand l'écartement est égal au côté de la surface. Si la seconde surface avait une section plus grande que la première, on pourrait calculer la résistance de l'air en remarquant qu'une partie de cette surface est frappée directement par l'air, et que l'autre portion est masquée par la première comme dans le cas précédent.

Des expériences de M. Thibault, il résulte encore que pour une surface A, faisant un angle α avec la direction du mouvement, la résistance de l'air est égale à celle qui aurait lieu contre la projection A sin α de la surface A sur un plan perpendiculaire à la direction du mouvement.

M. de Pambour, en appliquant les résultats de M. Thibault et ceux obtenus antérieurement par Dubuat à la résistance que l'air oppose au

mouvement des convois sur les chemins de fer, est arrivé aux résultats suivants :

Surface qu'un wagon présente au choc de l'air (445), elle se compose :

	pied car.
1° De la surface du chargement, qui est très-variable.	»
2° De la surface de projection du wagon proprement dit, surface qui est ordinairement, pour un wagon à simple plate-forme et pour une largeur de voie de 4 pieds 8 pouces 1/2 anglais.	14,33
3° De la surface due à la résistance que les rais des roues éprouvent à se mouvoir. M. de Pambour, en remarquant que tous les points des rais n'ont pas la même vitesse, estime cette surface à 1,25 pied carré pour une roue ordinaire de 3 pieds de diamètre ; ce qui fait, pour les deux roues de devant, 2,50 pieds carrés, et comme chaque rais masque le suivant, il réduit la surface précédente d'un tiers, ce qui donne.	1,67
4° De la surface due à ce que les roues, les essieux, les ressorts et les boîtes à graisse de derrière ne sont pas masqués complétement par les mêmes pièces de devant. M. de Pambour estime la surface de ces pièces, y compris celle 2.50 pieds due au mouvement des rais, à 7,03 pieds carrés, et en la réduisant d'un tiers, pour tenir compte de ce que ces pièces sont en partie préservées par les pièces semblables de devant, il obtient.	4,69
La surface totale des plus hauts wagons, y compris celle de la charge, est estimée, pour les voies de 5 pieds (1^m,524) environ de largeur, à. . .	70 ou 74
Pour les diligences, cette surface totale est de.	60 à 64

Ainsi, pour un wagon offrant une surface directe de 70 pieds carrés = 6,503 mètres carrés à l'action de l'air, la formule (a) devient, en remarquant que pour un wagon chargé la longueur étant moyennement égale à une fois et demie la racine carrée de la surface antérieure il convient de faire $\varepsilon = 1.15$,

$$R^3 = 0,0625 \times 1,15 \times 6,503 V^2.$$

Pour un convoi de plusieurs wagons, il faut, d'après ce qui précède, compter, pour la surface directe opposée à l'air, 70 pieds carrés pour le premier wagon, plus $4,69 \times 2 = 9,38$ pieds carrés pour les pièces de charronnage de chacun des wagons suivants. De plus, les wagons étant séparés entre eux de 2 pieds environ, l'air exerce encore une certaine résistance sur la face antérieure de chacun des wagons qui suivent le premier. M. de Pambour, de concert avec M. E. Wood, ingénieur du chemin de fer de Liverpool à Manchester, pour déterminer cette résistance, a opéré sur 5 wagons qu'il a fait descendre sur un plan incliné, d'abord séparément et ensuite réunis en convoi, et il a trouvé cette résistance égale à celle due à 3 pieds carrés de surface directe, ce qui fait par wagon intermédiaire $3/4 = 0,75$ pied carré. Cette surface, ajoutée à celle due aux pièces de charronnage, donne 10,13 pieds carrés, soit

10 pieds carrés de surface directe par wagon, non compris le premier. Dans ces expériences, la longueur du prisme formé par les 5 wagons réunis étant égale à sept fois la largeur, M. de Pambour, pour déterminer la résistance due à l'air, a pris, conformément aux observations de Dubuat, $\varepsilon = 1{,}07$; pour les wagons séparés, il a fait $\varepsilon = 1{,}15$.

D'après ce qui précède, pour un convoi de wagons, il faudra donc prendre pour surface directe opposée à l'air, d'abord 70 pieds carrés pour le premier wagon et ensuite 10 pieds carrés pris autant de fois qu'il y a de wagons placés à la suite du premier; dans le nombre des wagons on comprend la locomotive et son tender. Pour un convoi de diligences, il suffirait de remplacer 70 pieds carrés par 60 dans l'évaluation précédente. La surface ainsi déterminée et transformée en mètres carrés étant substituée dans la formule (*a*), on en conclura la résistance due à l'air en faisant ε égal à 1,15 pour un wagon, à 1,07 pour 5 wagons, à 1,05 pour 15 et à 1,04 pour 25.

M. de Pambour estime que si les roues, au lieu d'avoir, comme elles ont ordinairement, 3 pieds de diamètre, en avaient 5, il faudrait augmenter la surface directe opposée à l'air de 3 pieds carrés par wagon.

Application. Soit à déterminer la résistance due à l'air, pour un convoi composé de 15 wagons, la surface directe opposée à l'air par le plus grand wagon étant de 70 pieds carrés (6,503 mètres carrés), la surface directe due à chacun des autres wagons étant de 10 pieds carrés (0,929 mètre carré), et la vitesse étant de 40 kilomètres à l'heure, ce qui fait $11^{m},11$ par seconde.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (*a*), on a

$$R_3 = 0{,}0625 \times 1{,}05\,(6{,}503 + 0{,}929 \times 14)\,11{,}11 \times 11{,}11 = 158 \text{ kilog.}$$

437. ***Résistance totale à la traction sur un chemin horizontal et en ligne droite.*** Représentant cette résistance par R, on a, d'après les numéros précédents (434), (435) et (436), et en conservant aux lettres les mêmes significations que dans ces numéros,

$$R = Pf\frac{d}{D} + (P+p)f' + \theta\varepsilon A V^2.$$

438. ***Résistance totale à la traction sur un chemin en pente et en ligne droite.*** Cette résistance est (75, 434, 435 et 436)

$$P\cos\alpha f\frac{d}{D} + (P+p)\cos\alpha f' + \theta\varepsilon A V^2 \pm (P+p)\sin\alpha.$$

α angle que fait le plan incliné avec l'horizon;

$P\cos\alpha$ composante du poids P, normale au plan incliné; c'est la pression des fusées sur leurs boîtes;

$(P+p)\cos\alpha$ composante du poids total des wagons, normale au plan incliné; c'est la pression des roues sur les rails;
$(P+p)\sin\alpha$ composante du poids du convoi, parallèle au plan incliné; elle est positive ou négative suivant que le convoi monte ou descend.

Pour les cas ordinaires des chemins de fer, on peut, sans erreur sensible, supposer $\cos\alpha = 1$, et alors l'expression de la résistance à la traction, sur un chemin en pente et en ligne droite, devient

$$Pf\frac{d}{D} + (P+p)f' + \theta\kappa AV^2 \pm (P+p)\sin\alpha.$$

Il suffit que la pente du chemin soit de $\frac{1}{200}$ environ pour que le convoi descende seul, et lorsqu'elle atteint $\frac{1}{50}$, un convoi chargé descendant peut faire remonter un même convoi vide.

439. *Résistances dues aux courbes.* Outre les résistances précédentes (437 et 438), la courbure de la voie donne naissance à trois frottements de glissement.

Le premier de ces frottements est dû à la fixité des roues sur l'essieu. Une des roues glisse sur les rails sur une distance égale à la différence de longueur des deux courbes qui composent la voie. Le travail absorbé par ce frottement est, pour l'unité de poids et en remplaçant la différence de longueur des courbes par sa valeur en fonction de a, r et e,

$$f''\frac{2a}{r}e.$$

a demi-largeur de la voie ou demi-longueur de l'essieu; on a ordinairement $a = 0^m,75$ (n° 401);
r rayon de l'arc suivi par le centre de gravité du wagon;
e longueur de l'arc parcouru par le centre de gravité du wagon;
f'' coefficient de frottement de fer sur fer à l'état où se trouvent les jantes des roues et les rails; il est égal à 0,3 d'après Coulomb, et à 0,192 d'après M. Morin (446).

Divisant le travail précédent par l'espace parcouru, on a la résistance due au frottement précédent, qui est alors

$$f''\frac{2a}{r}.$$

Pour un wagon, cette résistance devient, en remarquant que la moitié du poids total $P+p$ du wagon repose sur les roues qui glissent,

$$(P+p)f''\frac{a}{r}.$$

Le deuxième frottement provient de ce que le parallélisme des essieux

oblige le wagon de glisser sur les rails en tournant autour de son centre de gravité pour changer de direction. Ce frottement et le précédent combinés absorbent, pour tout le parcours de l'arc et pour chaque unité de poids du wagon, un travail représenté par

$$f'' \sqrt{a^2+b^2} \times \frac{c}{r}.$$

Pour un wagon ce travail est

$$(P+p) f'' \sqrt{a^2+b^2} \times \frac{c}{r} \qquad (1)$$

Divisant par c, on a la résistance qui s'oppose directement au mouvement du wagon, qui est alors

$$(P+p) f'' \sqrt{a^2+b^2} \times \frac{1}{r}. \qquad (2)$$

b demi-distance des essieux, ordinairement $b = 0^m,75$.

L'expression (1) fait voir que le travail absorbé par le glissement dû à la fixité des roues et au parallélisme des essieux dépend de la longueur des essieux et de leur écartement, et qu'il est proportionnel à $\frac{c}{r}$, c'est-à-dire au supplément de l'angle que font entre elles les deux parties de chemin raccordées, mais qu'il est indépendant de r pour une même valeur de l'angle $\frac{c}{r}$. L'expression (2) montre que la résistance à la traction dépend également de a et de b, mais qu'elle est en raison inverse de r. Ainsi pour tourner d'un certain angle, le travail absorbé par le frottement en question est indépendant de r, mais la résistance est en raison inverse de r. Cette dernière cause, à part les accidents que peut occasionner un trop petit rayon adopté pour les courbes, est ce qui fait que sur les chemins à grande vitesse la valeur de r est généralement supérieure à 1000 mètres (451).

Le troisième frottement est dû à la force centrifuge, qui fait frotter les rebords des roues contre les rails.

Théoriquement la force centrifuge étant moindre que la résistance due au frottement des wagons sur les rails, même pour les vitesses en usage et pour un rayon de 300 mètres, qui est le plus petit employé dans la construction des chemins de fer, le rebord des roues ne devrait pas frotter contre les rails. C'est en effet ce qui aurait lieu si les wagons ne sautillaient pas en marchant; mais comme cet effet se produit toujours, il en résulte un frottement qui est exprimé, pour un wagon, par

$$\frac{P+p}{g} \times \frac{V^2}{r} f''' \frac{2c}{D} \qquad (119 \text{ et } 441)$$

V vitesse du centre de gravité du wagon, en mètres par seconde ;
D diamètre de la roue, pris à l'intérieur du rebord ;
c distance horizontale de la verticale passant par le centre de gravité de la roue, au point où la partie frottante du rebord de la roue commence à toucher la face latérale du rail ;
f''' coefficient du frottement du rebord de la roue contre le rail.

440. *Résistance totale qui s'oppose au mouvement d'un wagon sur une courbe en pente.* Cette résistance est égale à la somme de toutes les résistances précédentes (434 à 439) ; elle est donc

$$R = Pf\frac{d}{D} + (P+p)f' + \theta\varepsilon AV^2 + (P+p)f''\sqrt{a^2+b^2}\,\frac{1}{r} + \frac{(P+p)}{g} \times \frac{V^2}{r} f''' \frac{2c}{D} \pm (P+p)\sin\alpha.$$

f $= 0{,}05$ (n° 434) ;
$\frac{d}{D}$ = de 1/12 à 1/20, c'est ordinairement 1/14 (n° 434) ;
f' $= 0{,}001$ (n° 435) ;
θ et ε (n° 436) ;
f'' = 0,03 d'après Coulomb, et 0,192 d'après M. Morin (446) ;
$(P+p)$ (n° 430) ;
$a = b = 0^m{,}75$, et $\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{1{,}12} = 1$ à peu près (439) ;
f''' n'a pas encore été déterminé par des expériences assez concluantes pour lui assigner une valeur exacte (439 et 441).

441. *Résultats des expériences faites sur le chemin de Roanne à Andrezieux pour déterminer le frottement dû à la force centrifuge* (439).

Vitesse du wagon, 4 lieues à l'heure.

Rayon de la courbe, 100 mètres ;

Traction au dynamomètre, 0,033 $(P+p)$;

Soit x le frottement dû à la force centrifuge.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule du n° 440, elle donne, en faisant la résistance due au frottement des essieux et au pourtour des roues égale à 0,005 $(P+p)$, comme cela a lieu ordinairement sur les chemins de fer (434 et 435), et en négligeant la résistance de l'air, qui n'est, à la vitesse de 4 mètres par seconde et quand il n'y a qu'un wagon, que de $1^k{,}15$ par mètre carré de la surface opposée directement à l'air (436),

$$0{,}033\,(P+p) = 0{,}005\,(P+p) + \frac{0.3\sqrt{1{,}12}}{100}(P+p) + x,$$

d'où l'on tire

$$x = 0{,}02482\,(P+p),$$

résistance égale à trois fois celle due aux autres frottements.

Il conviendrait de reprendre ces expériences en se plaçant mieux dans les conditions habituelles des chemins de fer.

442. *Moyens pour déterminer le frottement total d'un wagon.*

Le premier moyen consiste à faire descendre librement un wagon sur un plan incliné et à constater l'espace parcouru pendant un certain temps (438).

Le wagon est soumis à l'action de deux forces : l'une, accélératrice, due à l'action de la pesanteur, et qui est $(P+p)\sin\alpha$, composante du poids du wagon parallèle au plan incliné (73) ; l'autre, retardatrice, qui est le frottement du wagon. Sous l'influence de ces forces, le wagon prend un mouvement accéléré (11 et suivants), et après un certain temps on a, en remarquant que dans ce cas l'accélération de la vitesse est à l'accélération g due à la pesanteur dans le rapport de, $(P+p)\sin\alpha - x$ à $P+p$,

$$E = \frac{1}{2} g \frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P+p} T^2,$$

d'où

$$x = (P+p)\sin\alpha - \frac{2E}{gT^2}(P+p).$$

Cette valeur de x serait exacte si tout le système n'était doué que d'un simple mouvement de translation ; mais les roues et les essieux possédant, outre le mouvement de translation, un mouvement de rotation, il en résulte que la masse effective soumise au mouvement de translation se compose de celle dont le poids est $P+p$, plus d'une masse, laquelle, appliquée à la circonférence de la roue et ayant par conséquent la vitesse de translation, aurait, par rapport à l'axe des roues, le même moment d'inertie que les roues et essieux. Si les roues étaient des cylindres pleins de matière homogène, c'est-à-dire si les essieux remplaçaient exactement les vides laissés entre les rais, on aurait théoriquement cette masse fictive (99 et suivants). Des expériences directes de M. N. Wood, sur des essieux garnis seulement de leurs roues, ont donné 0,54 pour le rapport de cette masse fictive à la masse des roues et des essieux. La masse effective mise en mouvement par la force motrice $(P+p)\sin\alpha - x$, au lieu d'être $\frac{P+p}{g}$, étant $\frac{P+p+0{,}54p}{g}$, l'accélération réelle de vitesse est dans le rapport inverse de ces masses, et devient (20) $g\frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P+p} \times \frac{P+p}{P+1{,}54p}$; on a donc, en simplifiant,

$$E = \frac{1}{2} g \frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P+1{,}54p} T^2; \qquad (a)$$

d'où l'on tire

$$x = (P + p)\sin\alpha - \frac{2E}{gT^2}(P + 1{,}54\,p).$$

Dans cette valeur de x se trouve encore comprise la résistance de l'air, résistance facile à calculer, d'après ce qui a été dit n° 436, pour le cas d'un mouvement uniforme, régime que prennent les wagons ordinaires après quelques tours de roues sur un plan incliné au centième.

E espace parcouru pendant le temps T qu'a duré l'observation ;
P poids du wagon et de sa charge ;
p poids des roues et des essieux. On a à peu près $p = 850$ kilog. pour un wagon ordinaire ;
α angle que fait le plan incliné avec l'horizon ;
x résistance totale qui s'oppose au mouvement du wagon.

Le deuxième moyen pour déterminer le frottement total d'un wagon consiste à faire marcher librement ce wagon sur deux plans inclinés en sens inverse et se raccordant par une courbe à leur partie inférieure.

Si toutes les résistances qui s'opposent au mouvement du wagon étaient nulles, le wagon, après avoir librement descendu d'une certaine hauteur verticale sur une rampe, remonterait à la même hauteur sur l'autre. Soient :

H la descente verticale du wagon sur l'un des plans, et α l'angle d'inclinaison de ce plan ;
h la montée verticale du wagon sur l'autre plan, et α' l'angle d'inclinaison de ce plan ;
E l'espace parcouru sur le premier plan ;
E' l'espace parcouru sur le second plan, quand le wagon cesse de monter ;
$(P+p)$ le poids total du wagon et de ses roues ;
x la résistance totale qui s'oppose au mouvement du wagon.

L'accélération de vitesse sur le premier plan est, en supposant uniforme la résistance de l'air et en remarquant que la force $(P+p)\sin\alpha - x$ sollicite, comme dans le cas précédent, une masse effective $\frac{P + 1{,}54p}{g}$,

$$g\,\frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P + 1{,}54p},$$

et la vitesse que possède le wagon quand il arrive au bas de ce plan est (n° 17, en remplaçant dans l'équation $v = gt$, t par sa valeur tirée de l'équation $E = \frac{1}{2}gt^2$)

$$v = \sqrt{2g\,\frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P + 1{,}54p}\,E}.$$

Sur le second plan, l'accélération de vitesse retardatrice est, en re-

marquant que la force $(P+p)\sin\alpha' - x$ sollicite la même masse effective $\frac{P+1{,}54p}{g}$, mais en sens contraire du mouvement,

$$g\,\frac{(P+p)\sin\alpha' - x}{P+1{,}54p},$$

et quand le wagon a parcouru l'espace E', la perte de vitesse est

$$v' = \sqrt{2g\,\frac{(P+p)\sin\alpha' - x}{P+1{,}54p}\,E'}.$$

Or, comme le wagon cesse de monter, on doit avoir $v = v'$, c'est-à-dire

$$\sqrt{2g\,\frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P+1{,}54p}\,E} = \sqrt{2g\,\frac{(P+p)\sin\alpha' - x}{P+1{,}54p}\,E'};$$

d'où l'on tire, en remarquant que $E\sin\alpha = H$ et $E'\sin\alpha' = h$,

$$x = \frac{(P+p)(H-h)}{E-E'}.$$

M. N. Wood a trouvé, par expérience, que la vitesse ne dépassant pas 4 lieues à l'heure, la valeur de x, résistance de l'air comprise, variait entre $\frac{1}{200}$ et $\frac{1}{250}$ (de 0,005 à 0,004) de $P+p$ pour un rapport $\frac{D}{d}$ du diamètre de la fusée à celui de la roue compris entre 1/13 et 1/15. M. de Pambour est arrivé à peu près aux mêmes résultats; il a trouvé que la valeur de x était, déduction faite de la résistance de l'air, de 2k,69 par tonneau brut, c'est-à-dire de $\frac{1}{375}(P+p)$, pour des roues de 3 pieds (0m,915) de diamètre et des fusées de 1 pouce 3/4 (0m,045), c'est à-dire pour un rapport $\frac{d}{D} = \frac{1}{20}$, les boîtes étant garnies de coussinets en bronze et graissées d'une manière continue.

Un *troisième moyen* consiste dans l'emploi du dynamomètre.

443. *Expériences de* M. N. Wood. Cet expérimentateur, en enlevant les caisses des wagons, a supprimé le frottement des essieux dans leurs boîtes et en grande partie la résistance de l'air, et il a trouvé, en lançant ces essieux, plus ou moins chargés, sur des plans inclinés, que la résistance au pourtour des roues était à peu près 0,001 du poids total (435).

M. Wood a encore déterminé directement le frottement des essieux dans leurs boîtes en les faisant tourner après les avoir chargés. Il a reconnu que la charge de l'essieu ne devait pas dépasser 6k,33 par centimètre carré de sa surface de contact avec ses boîtes; au-dessus de cette limite, la graisse est chassée et les surfaces frottantes s'entament. Le

graissage continu mis en usage permet de dépasser de beaucoup cette pression (430 et 431). Il a aussi reconnu que la boîte étant en très-bon état et la graisse bien préparée et bien distribuée, le frottement n'était que le $\frac{1}{60}$ de la charge, au lieu du $\frac{1}{8}$ qu'a donné Coulomb (62); en pratique on admet qu'il est $\frac{1}{20}$ (434).

444. *TABLEAU des résistances totales au mouvement, obtenues par* M. Lardener, *en lançant des wagons sur des plans diversement inclinés.* Ces résistances sont égales à $(P+p)\sin\alpha$, quand la vitesse des wagons est devenue uniforme (438).

DÉSIGNATION DES VENTS.	PENTE.	RÉSISTANCE	VITESSE uniforme en kilomètres par heure.
Calme parfait.	1/250	1/250 $(P+p)$	30
Id.	1/89	1/89 $(P+p)$	54
Vent derrière.	1/96	1/96 $(P+p)$	54
Id.	1/265	1/265 $(P+p)$	30
Id.	1/167	1/167 $(P+p)$	38
Vent de bout.	1/96	1/96 $(P+p)$	43
Vent de côté.	1/177	1/177 $(P+p)$	27

Le vent de côté est le plus défavorable.

445. *Résistance totale que les convois opposent au mouvement.*

Dans ces derniers temps on a fait sur plusieurs chemins de fer français et anglais, avec le dynamomètre et des diagrammes relevés à l'aide de l'indicateur de Watt, des expériences dans le but de constater la résistance que les convois opposent au mouvement.

Des résultats obtenus, les auteurs du *Guide du Mécanicien* concluent que pour un convoi brut de 60 tonnes (26 pour la machine avec son tender et 34 pour les wagons), marchant à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure, on peut diviser la résistance de la manière suivante :

1° *Résistance du convoi brut :*		*pour le convoi.*	*par tonne.*
Id.	due au mouvement des véhicules.	375k	6k,25
Id.	due aux frottements du mécanisme sans charge.	150	2 ,50
Id.	due à l'augmentation des frottements du mécanisme produite par la pression de la vapeur.	105	1 ,75
	Totaux.	630	10 ,50

2° *Résistance de la machine avec son tender :*	pour 26 tonnes.	par tonne.
Id. due au mouvement comme véhicules.	162k,50	6k,25
Id. due aux frottements du mécanisme sans charge.	149 ,50	5 ,75
Id. due à la pression de la vapeur.	104 ,00	4 ,00
Totaux.	416 ,00	16 ,00

Sauf l'erreur due aux approximations adoptées en passant des nombres 2,30 et 1,75 à ceux 5,75 et 4,00, en ajoutant à la résistance 416k,00 du moteur, la résistance 6,25 × 34 = 212k,5 des wagons, on trouve la première résistance totale 630k,00 du convoi.

Des expériences faites avec le dynamomètre de M. Morin, par M. J. Poirée, sur le chemin de fer de Paris et Lyon, d'abord de Paris à Melun, puis de Melun à Paris, afin que la moyenne représentât le tirage sur niveau, il résulte que pour remorquer une machine mixte de la ligne de Lyon et son tender, chargés d'eau et de coke, il faut compter sur une traction de 11 kilog. par tonne, la vitesse étant de 45 à 50 kilomètres à l'heure.

M. Wyndham Harding, en discutant les différents résultats obtenus pour la résistance des convois sur un chemin horizontal, a posé la formule empirique suivante, qui peut, dans les cas ordinaires, servir de point de départ pour calculer les dimensions des machines locomotives (455),

$$R = 2,72 + 0,094V + 0,00484\,\frac{NV^2}{P}.$$

R résistance en kilogrammes;
V vitesse du convoi en kilomètres par heure;
N surface de front du train ou sa plus grande section, en mètres carrés; en général on peut faire N = 5;
P poids du convoi en tonnes;

Le premier terme 2,72 est le coefficient du frottement des véhicules;
Le second, qui est proportionnel à la vitesse, exprime la résistance qui est due aux chocs, aux secousses et aux vibrations de la voie;
Le troisième, qui est proportionnel au carré de la vitesse, est dû à la résistance du vent (436).

Cette formule s'applique à tout le convoi (machine, tender et wagons) aussi bien qu'aux wagons seuls; mais alors elle ne tient pas compte de la résistance due aux frottements du mécanisme de la machine, et il faut pour avoir la résistance totale T augmenter R de 20 ou 25 pour 100 selon qu'il s'agit d'un convoi de voyageurs ou d'un convoi de marchandises.

446. *Résistance que les wagons à freins opposent au mouvement du convoi quand les freins sont serrés.* Des expériences faites au dynamomètre sur le chemin de Lyon, par M. Jules Poirée, il résulte :

1° Que pour des petites vitesses cette résistance peut varier de 0,11 à 0,25 du poids du wagon selon que les rails sont humides ou secs;

2° Que cette résistance diminue avec la vitesse : ce qui montre que le frottement des roues sur les rails doit diminuer, puisque évidemment la résistance de l'air augmente avec la vitesse (58 et 436). Dans les limites de poids et de vitesses usuelles, la diminution de résistance résultant de l'augmentation de la vitesse est indépendante du poids des wagons et de l'état des rails ; elle peut être représentée par $25\,v - 0{,}35\,v^2$; de sorte que l'on a

$$R = fP - 25v + 0{,}35v^2.$$

R résistance des wagons à freins, les freins étant serrés ;
P poids du wagon ;
f coefficient de frottement que l'on peut faire égal à 0,13 pour les rails humides, et à 0,30 pour les rails très-secs. Dans le calcul de la charge que peut traîner une locomotive, on peut faire $f = 0{,}17$ (n° 453) ;
v vitesse, que la formule suppose comprise entre 5 et 22 mètres par seconde. Ces vitesses sont évidemment supérieures à celles qui ont servi de base à la loi du n° 58.

447. *Plans automoteurs.* Sur ces plans, pour obtenir la résistance due au frottement de la corde et à sa roideur, et au frottement des axes du tambour, des petites poulies et des rouleaux qui supportent la corde, on a fait descendre librement un wagon chargé qui en faisait remonter un même vide, et on a tiré cette résistance de la formule suivante établie de la même manière que celle (a) n° 442 :

$$E = \frac{1}{2} g \frac{(P+p+c)\sin\alpha - (P+p)\sin\alpha - \dfrac{P+p+c+P+p}{240} - X}{P+p+c+P+p+\omega+0{,}54\,(2p+p')} T^2.$$

Dans cette formule, tout est connu à l'exception de X.

X résistance cherchée ;
E espace parcouru pendant le temps T qu'a duré l'expérience ;
P poids du wagon descendant : on suppose qu'il est le même pour le wagon montant ;
p poids des roues de chaque wagon ;
p' poids des pièces qui tournent, autres que les roues de wagons ;
c charge du wagon descendant ;
1/240 coefficient de la résistance à la traction des wagons sur le chemin de fer ;
ω poids de la corde ;
0,54 $(2p+p')$ poids des masses fictives, lesquelles appliquées à la circonférence des pièces qui tournent, roues, tambours, poulies et rouleaux, et ayant par conséquent la vitesse des wagons, auraient, par rapport aux axes de ces pièces, le même moment d'inertie que ces pièces elles-mêmes (442).

M. N. Wood, en opérant ainsi, a trouvé $X =$ de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{5}$ $(p'+\omega)$, cette résistance étant appliquée sur les tourillons des petites poulies, et comme le diamètre de ces tourillons est le $\frac{1}{12}$ de celui des poulies, cette résis-

tance appliquée au pourtour des poulies est de $\frac{1}{36}$ $(p'+\omega)$. D'autres expérimentateurs ont trouvé $\frac{1}{22}$ et $\frac{1}{24}$ de $(p'+\omega)$; mais les expériences ont été faites avec moins de soin; du reste il serait très-convenable de reprendre ces expériences et de tenir compte de la résistance de l'air, qu'on a négligée.

448. *Charge que peut traîner un cheval sur un chemin de fer.* Supposant que la résistance à la traction des wagons remorqués par des chevaux est $\frac{1}{200}$ de la charge brute (chargement et wagons) (442), la charge brute traînée par un cheval est donnée par la formule

$$\frac{X}{200} = 70 \text{ kilog.}, \quad \text{d'où} \quad X = 14000 \text{ kilog.}$$

X charge brute traînée;
70k. traction moyenne d'un cheval travaillant 10 heures par jour et parcourant 3240 mètres par heure (36).

Sur une rampe, la charge que peut traîner un cheval est donnée par la formule

$$\frac{X}{200} \pm X \sin \alpha \pm Q \sin \alpha = 70 \text{ kilog.}$$

α angle que fait le plan incliné avec l'horizon ;
Q poids du cheval ;
$X \sin \alpha$ et $Q \sin \alpha$, composantes, parallèles au plan incliné, de la charge traînée et du poids du cheval ; elles sont positives ou négatives suivant qu'on monte ou qu'on descend (438).

449. *Machines fixes.* A l'origine des chemins de fer, on faisait usage de machines fixes pour remorquer les convois ; elles étaient espacées entre elles de 2000 mètres, et des cordes, auxquelles on fixait les convois, allaient de l'une à l'autre.

MACHINES LOCOMOTIVES.

450. *Classification des machines locomotives.* D'après la nature de leur service, les locomotives se divisent :

1° En *machines à voyageurs*, affectées exclusivement au transport des voyageurs, et marchant avec une vitesse d'au moins 40 à 50 kilomètres à l'heure, en remorquant 14 ou 15 voitures sur un chemin à rampes de 0m,005 par mètre. Sur certains chemins, des machines spéciales marchent, dans les circonstances régulières du service, à une vitesse de 80 à 100 kilomètres, en remorquant 7 ou 8 voitures. Les roues motrices sont indépendantes des autres roues, et leur diamètre, qui varie de

1m,68 à 2m,10, et même 2m,20 à 2m,35 et au delà pour les machines Crampton, se proportionne à la vitesse de translation que l'on veut obtenir. La course des pistons est faible relativement au diamètre des roues.

2° En *machines à marchandises*, qui sont disposées pour remorquer de très-fortes charges à des vitesses comprises entre 20 et 30 kilom. à l'heure. Les roues motrices ont de 1m,20 à 1m,50, selon la vitesse, et elles sont accouplées avec une ou deux autres paires de roues de même diamètre. La course des pistons est grande. Ces machines remorquent 40 wagons.

3° En *machines mixtes*, lesquelles, faisant à la fois le service des deux espèces précédentes, marchent à des vitesses de 35 à 40 kilom., et accidentellement 50 kilom. Leurs roues motrices ont de 1m,50 à 1m,60 de diamètre, et elles sont accouplées avec une autre paire de roues. Ces machines remorquent, sur un chemin à rampes de 5 millimètres par mètre, 20 voitures, tant à voyageurs qu'à marchandises. Lorsque la pente dépasse 0m,005, on est obligé d'avoir recours à ces locomotives pour le service des voyageurs, à cause de la plus grande adhérence sur les rails que donnent les roues accouplées.

4° On construit encore des *machines-tender* qui portent elles-mêmes leur eau et leur coke. Elles conviennent pour les petits trajets. Si elles sont appliquées au service des voyageurs dans la banlieue d'une grande ville, les roues motrices sont indépendantes; celles du chemin d'Auteuil seront à 4 roues accouplées; quand elles sont utilisées à former les trains dans les gares, ou comme machine de renfort sur une rampe, les 6 roues sont accouplées et d'un petit diamètre, et on augmente la course des pistons. En Angleterre, sur quelques embranchements, on a construit des voitures à voyageurs qui portent leur machine et qui marchent isolément.

Les locomotives se divisent aussi en machines à cylindres intérieurs et en machines à cylindres extérieurs. Les premières ayant les cylindres placés entre deux roues d'un même essieu, et par suite entre les rails de la voie, elles offrent plus de stabilité et un mouvement plus régulier que les machines à cylindres extérieurs; mais leur essieu moteur, qui est deux fois coudé, présente plus de difficulté de fabrication et de chances de rupture qu'un essieu droit. Les secondes machines ayant leurs cylindres placés en dehors du bâti et en surplomb à l'extérieur de la voie, la construction est simplifiée, l'essieu coudé est supprimé, et les principales pièces motrices sont bien en vue du mécanicien; mais quoi que par cette disposition le centre de gravité de la machine puisse être placé à 0m,12 ou 0m,15 plus bas, s'il n'était possible d'appliquer un correctif simple à l'instabilité, sous ce rapport, l'avantage serait en faveur des machines à cylindres intérieurs.

M. Stephenson a construit une machine à trois cylindres, un inté-

rieur, et deux extérieurs dont le travail total est équivalent à celui du premier.

M. Verpilleux, pour la remonte des wagons de houille sur le chemin de Saint-Étienne, a imaginé de placer deux cylindres supplémentaires sur le tender pour utiliser l'adhérence de ce véhicule sur les rails.

On peut encore classer les locomotives d'après le nombre des roues. Les premières locomotives étaient à 4 roues, comprises entre la boîte à feu et la boîte à fumée. La distance des essieux était de 2 mètres, ce qui permettait aux machines de circuler sur des courbes à petit rayon. On a attribué au peu de stabilité de ces machines différents accidents, qui les ont fait abandonner pour employer uniquement les machines à 6 roues, qui donnaient la grande puissance qui était réclamée, sans fatiguer davantage les rails; aujourd'hui les locomotives à 4 roues ne sont guère en usage que pour des terrassements.

En Amérique, on a établi des machines à 8 roues.

Enfin on peut encore classer les locomotives d'après la position des roues. Le besoin d'une grande puissance de vaporisation ayant fait abandonner les machines à 4 roues, on plaça un essieu à l'arrière du foyer, en laissant les roues motrices au milieu. En augmentant ainsi le nombre des points d'appui, on put augmenter les dimensions de la chaudière, y placer 111 tubes au lieu de 82, et porter la surface de chauffe de 22m.q.,5 à 52m.q.. En 1842, tout en conservant le même écartement des essieux extrêmes, on remit le foyer en porte-à-faux; alors la longueur des tubes devint 3m,80, et la surface de chauffe totale 66m.q.; puis cette surface arrive successivement à 70m.q., et même 95m.q. lorsque les plaques tournantes le permettent. En 1842, M. Crampton, en portant l'essieu moteur à l'arrière du foyer et en espaçant les essieux extrêmes de 4m,86, a pu donner un très-grand diamètre aux roues motrices, augmenter dans une proportion considérable la surface de chauffe directe dans le foyer, porter à 178 le nombre des tubes, et obtenir 102m.q. de surface de chauffe. Les essieux moteurs des machines Crampton étant peu chargés, ces machines ne peuvent remorquer que de faibles charges; mais leurs grandes roues motrices et leur puissance extraordinaire de vaporisation les rendent très-convenables pour marcher à grande vitesse. Les cylindres sont fixés à l'extérieur, contre la chaudière.

451. *Pression de la vapeur dans la chaudière, et dans les cylindres et derrière les pistons.* Dans les anciennes machines, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière était généralement de 4,5 atmosphères; mais dans les nouvelles, on l'a portée successivement à 5, 6, 7 et 8 atmosphères, et quelques ingénieurs anglais paraissent même disposés à aller au delà.

MM. Gouin et Le Chatelier ont reconnu, en 1844, à l'aide d'une machine à détente fixe, qu'à la vitesse de 45 kilom. à l'heure, l'ouverture

du régulateur ayant varié de 15c.q. à 91c.q., la pression dans la boîte des tiroirs a varié de 0,64 à 0,96 de celle de la chaudière; ils ont reconnu aussi que la tension dans la boîte des tiroirs ne croissait plus sensiblement en donnant au régulateur une ouverture supérieure à 55c.q.; ils ont en outre constaté que la perte de tension que subissait la vapeur en passant par les lumières du tiroir et les conduits aboutissant au cylindre était de 9 à 10 pour 100; de sorte que le régulateur étant complétement ouvert, la tension est à peu près de 15 pour 100 moins élevée dans les cylindres que dans les chaudières. Pour une machine placée dans de bonnes conditions, il y a lieu de prendre 10 pour 100 pour cette différence.

La plus faible pression observée lorsque le régulateur était à peine ouvert, s'est élevée à 0,36 de la pression dans la chaudière.

Quelques expériences spéciales ont permis de constater que le régulateur étant ouvert à la section moyenne de 50c.q., et le niveau de l'eau dans la chaudière étant très-élevé, sans qu'il y eût cependant projection d'eau dans la cheminée, la tension dans le cylindre s'abaissait à 0,75 de celle de la chaudière, et que quand la machine primait abondamment, elle s'abaissait à 0,62.

Pour les anciennes machines vaporisant 1m.c.,7 d'eau par heure, la tuyère qui injectait dans la cheminée la vapeur sortant du cylindre avait 0m,05715 de diamètre, ce qui fait 25,64 centimètres carrés de section (458); pour une autre puissance de vaporisation, cette section varierait dans le même rapport. Avec ces proportions, il résulte des expériences, déjà bien reculées, de M. de Pambour, que la pression derrière le piston, en kilogrammes sur un centimètre carré, est représentée par

$$0{,}007\,662\,v. \qquad (454 \text{ p. } 566)$$

v vitesse de la machine en kilomètres par heure.

Cette pression est la force élastique absolue de la vapeur diminuée d'une atmosphère.

Une machine à marchandises, système Polonceau (458), détente par coulisse Stephenson à 0m,23 de la course du piston, a donné à M. Bertera, pour une vitesse de 25,2 kilom., les résultats suivants, qui sont exprimés en kilogrammes par centimètre carré,

Pression absolue dans la chaudière.	5k,98
Id. dans la boîte des tiroirs.	5 ,23
Id. dans le cylindre pendant l'admission. .	3 ,37
Id. moyenne sur le piston.	2 ,36
Pression moyenne derrière le piston.	1 ,59
Pression effective moyenne sur le piston.	0 ,77

D'après quelques essais de MM. Gouin et Le Chatelier, la pression

effective de la vapeur derrière le piston étant de 0m,76 de mercure, dans la boîte du tiroir elle n'était plus que de 0m,15, et de 0m,07 à 0m,08 à l'orifice de la tuyère.

452. *Avance et recouvrement. Détente.* Pour que la vapeur qui remplit le cylindre commence à s'échapper, et que la vapeur soit admise sur la face opposée du piston, un peu avant que ce piston arrive à la fin de sa course, on donne une certaine avance au tiroir en calant convenablement l'excentrique, et comme l'avance à l'admission doit être très-faible et celle à l'échappement considérable, on réduit la première en élargissant intérieurement les bords du tiroir, c'est-à-dire en leur donnant un certain recouvrement sur les lumières.

L'avance du tiroir fait agir la vapeur par détente pendant une portion de la course du piston, portion que l'on augmente en donnant du recouvrement extérieur au tiroir.

Les éléments de la distribution des machines à voyageurs du chemin de fer du Nord sont les suivants :

Course du piston.	0m,560
Course tu tiroir.	0 ,110
Écartement des bords extérieurs des lumières d'admission.	0 ,196
Id. intérieurs *id.*	0 ,116
Avance angulaire.	30°
Recouvrement extérieur de chaque côté.	0m,024
Id. intérieur *id.*	0 ,001
Avance linéaire à l'admission.	0 ,005
Id. à l'échappement	0 ,028

Ces proportions fournissent les résultats suivants :

L'introduction de la vapeur commence un instant avant que le piston soit arrivé à l'extrémité de la course pour reprendre son mouvement rétrograde.

La vapeur est introduite sur une portion de la course du piston, à partir de son origine, égale à 0m,438, et la détente a lieu sur le reste 0m,122 de la course.

L'échappement commence lorsque le piston a encore à parcourir 0m,034.

L'échappement est fermé et la vapeur se comprime derrière le piston sur une longueur de 0m,042.

La détente produite par avance et recouvrement est la *détente fixe* des machines locomotives ; elle est aux 4/5 environ dans l'exemple précédent (348) ; on la pousse généralement aux 2/3, et quelquefois au 1/2 ; mais alors on rend le démarrage plus difficile.

On a cherché à appliquer la détente variable aux locomotives, afin que, pendant la marche, le mécanicien puisse augmenter ou diminuer la puissance de sa machine selon les circonstances ; mais jusqu'à présent aucun des systèmes essayés, qui sont formés de deux ou trois tiroirs superposés, n'est devenu d'un usage général, à cause des sujétions occasionnées par la grande complication.

La *coulisse de Stephenson* permet d'obtenir, avec la distribution or-

dinaire à deux excentriques et à un seul tiroir, une détente variable qui, quoique imparfaite, n'en est pas moins devenue d'un usage très-général, à cause de sa simplicité et de l'amélioration qui en est résultée dans le mécanisme destiné à opérer le changement de marche. Avec cette coulisse, qui est en arc de cercle, on peut faire varier la détente depuis 6/7 jusqu'à 1/3 et même 1/5.

453. *Adhérence des roues motrices sur les rails.* Pour qu'une machine locomotive puisse remorquer un convoi, il faut non-seulement que sa force soit suffisante pour traîner ce convoi, mais aussi qu'il y ait, au minimum, sans atteindre cette limite, équilibre dynamique entre l'adhérence au pourtour des roues motrices et la force moyenne transmise par les pistons tangentiellement aux manivelles, non compris la portion de cette force absorbée par le service des pompes et les différentes résistances passives de la locomotive, sans quoi les roues motrices tourneraient sur place. On doit donc avoir (48)

$$R\pi D > F\pi d\ ;$$

R adhérence ou frottement de glissement des roues motrices sur les rails; $R=0{,}30P$ sur des rails très-secs, $R=0{,}13P$ pour les rails humides, et dans la pratique il convient de supposer $R=0{,}17P$ (n° 446);

P pression des roues motrices sur les rails; dans la pratique il convient que P ne dépasse pas 10000 kil. pour deux roues motrices (455 et 458);

D diamètre des roues motrices (458);

d diamètre des manivelles ou course des pistons (458);

F pression moyenne transmise par les deux pistons tangentiellement aux manivelles (86).

454. *Théorie des machines locomotives.* Cette théorie est un extrait de celle plus complète donnée par M. de Pambour dans son *Traité des machines locomotives*, publié en 1840. Depuis le travail de M. de Pambour, les locomotives ayant changé dans leurs dispositions et proportions, et surtout dans la distribution de la vapeur par les tiroirs, il y aurait lieu de faire de nouvelles expériences pour assigner eux coefficients les valeurs qui leur conviennent aujourd'hui. La théorie des locomotives revient à la solution du problème suivant et de sa réciproque : *Étant données les dimensions d'une machine locomotive, trouver la charge qu'elle peut traîner avec une certaine vitesse ;* réciproquement, *étant données la charge à traîner et la vitesse, trouver les dimensions de la machine.*

1° *Proposition directe.* Pour qu'il y ait équilibre dans une machine locomotive, on doit avoir, en rapportant la puissance et les résistances à un mètre carré de surface de piston,

$$R = R' + F' + p + p'v. \qquad (1)$$

R pression de la vapeur sur un mètre carré de surface de piston;

R' résistance qu'oppose le convoi au mouvement des pistons ;

F' résistance que les frottements de la locomotive opposent au mouvement des pistons ;
p résistance due à la pression atmosphérique ; elle est de 10 333 kilog. par mètre carré (347) ;
$p'v$ résistance due à la vitesse avec laquelle la vapeur s'échappe dans la cheminée.

Si l'on voulait rapporter la puissance et les différentes résistances aux surfaces des deux pistons, il suffirait de multiplier R, R', F', p et $p'v$ par $\frac{1}{2}\pi d^2$, d étant le diamètre des pistons en mètres.

Il s'agit alors de déterminer les valeurs de R', F', p et $p'v$.

La résistance totale que le convoi oppose au mouvement des pistons est $\frac{R'\pi d^2}{2}$, et, en appelant R'' la force nécessaire pour tirer directement le convoi, pour qu'il y ait équilibre dynamique entre R' et R'', on doit avoir

$$\frac{R'\pi d^2}{2} \times 2l = R''\pi D, \quad \text{d'où} \quad R' = R''\frac{D}{d^2 l}; \qquad (27 \text{ et } 48)$$

l course des pistons ;
D diamètre des roues motrices.

Sur un chemin de fer, on a

$$R'' = KM + Km + uv^2 \pm (M + m)\sin\alpha ;$$

$K = \frac{1}{250}$, coefficient de la résistance que le frottement des wagons oppose au mouvement (442) ;
M poids du convoi et du tender (430) ;
$KM = fP\frac{d}{D} + f'(P + p)$ (nos 434 et 435) ;
m poids de la locomotive (458) ;
v vitesse du convoi en kilomètres par heure ;
$uv^2 = 6\varepsilon AV^2$ résistance que l'air oppose au mouvement du convoi (436) ;
α angle que fait le chemin avec l'horizon ;
$(M + m)\sin\alpha$ composante du poids total, parallèle au chemin ; elle est nulle sur un chemin de niveau, et sur un chemin en pente elle est positive ou négative suivant que le convoi monte ou descend (438).

Remplaçant R'' par sa valeur dans celle de R', on a

$$R' = [KM + Km + uv^2 \pm (M + m)\sin\alpha]\,\frac{D}{d^2 l}. \qquad (2)$$

La résistance F' des différentes pièces de la locomotive sur les pistons est due à la résistance directe F de ces pièces quand la machine marche à vide, plus à une résistance directe δ qui est proportionnelle à l'effort de traction (445 et 455). En rapportant ces deux résistances au mouvement direct du convoi, on a donc, pour l'équilibre dynamique,

$$F'\pi d^2 l = F\pi D + \delta\,[KM + uv^2 \pm (M+m)\sin\alpha]\,\pi D;$$

d'où l'on tire

$$F' = F\,\frac{D}{d^2 l} + \delta\,[KM + uv^2 \pm (M+m)\sin\alpha]\,\frac{D}{d^2 l} \qquad (3)$$

$\delta = 0,14$ pour les locomotives à roues libres;
$\delta = 0,22$ pour les locomotives à roues couplées.

La valeur de $p'v$ est connue quand, pour une grandeur déterminée de v, on a p'. D'après les expériences de M. de Pambour, p' est donné par la formule

$$p' = \beta\,\frac{S'}{O}.$$

β coefficient égal à 0,11557;
S' quantité d'eau vaporisée en mètres cubes par heure; cette valeur de S' suppose qu'il n'y a pas de fuites de vapeur; dans le cas contraire, on diminuerait S' pour en tenir compte;
O section de la tuyère en centimètres carrés.

Dans l'exemple cité n° 451, on a $\frac{S'}{O} = \frac{1,7}{25,64} = 0,0663$; d'où l'on conclut

$$p' = 0,11557 \times 0,0663 = 0,007\,662.$$

La pression sur un centimètre carré du piston est donc $0,007\,662v$ kil., et pour un mètre carré on a $p'v = 76,62v$ kilog.; cette valeur de $p'v$ suppose v exprimé en kilomètres par heure.

Substituant les valeurs de R' et de F', (2) et (3), ainsi que celle de p' dans la valeur de R (1), on a, en remarquant que Km est compris dans la valeur de F,

$$R = [KM + uv^2 \pm (M+m)\sin\alpha]\,\frac{D}{d^2 l} + F\,\frac{D}{d^2 l} + \delta[KM + uv^2 \pm (M+m)\sin\alpha]\,\frac{D}{d^2 l} + p + 76,62v,$$

ou

$$R = (1+\delta)\,[(K \pm \sin\alpha)\,M \pm m\sin\alpha + uv^2]\,\frac{D}{d^2 l} + F\,\frac{D}{d^2 l} + p + 76,62v. \;(4)$$

On a

$$s = \mu S.$$

s volume de vapeur à la pression R dépensé par heure dans le cylindre;
S volume de l'eau qui a produit le volume s de vapeur;
μ rapport de s à S (266).

On peut poser

$$\mu = \frac{1}{n + qR}.$$

n et q quantités constantes égales respectivement à 0,0001421 et 0,0000000471 quand R est exprimé en kilogrammes sur un centimètre carré.

Remplaçant dans cette équation R par sa valeur (4), on a

$$\mu = \frac{1}{n + q\left\{(1+\delta)\left[(K \pm \sin\alpha)M \pm m\sin\alpha + uv^2\right]\frac{D}{d^2 l} + F\frac{D}{d^2 l} + p + 76{,}62v\right\}}. \quad (5)$$

La dépense de vapeur pour chaque coup de piston est

$$\frac{1}{4}\pi d^2(l+c).$$

$c = 0{,}05\,l$ liberté du cylindre ou espace perdu entre les fonds du cylindre et les faces du piston, y compris les passages de vapeur entre les tiroirs et le cylindre.

Le nombre des coups donnés par les 2 pistons et celui des tours faits par chaque roue motrice en une heure sont alors

$$\frac{\mu S}{\frac{1}{4}\pi d^2(l+c)} \quad \text{et} \quad \frac{\mu S}{\pi d^2(l+c)}.$$

Le chemin parcouru, aussi en une heure, c'est-à-dire la vitesse de la locomotive en mètres par heure, est donc

$$V = \frac{\mu S \pi D}{\pi d^2(l+c)} = \frac{\mu S D}{d^2(l+c)};$$

et en kilomètres cette vitesse est

$$v = \frac{V}{1000} = \frac{1}{1000} \times \frac{\mu S D}{d^2(l+c)}.$$

Remplaçant μ par sa valeur (5), on a

$$v = \frac{1}{1000} \times \frac{1}{q} \times \frac{l}{l+c} \times \frac{S}{(1+\delta)\left[(K \pm \sin\alpha)M \pm m\sin\alpha + uv^2\right] + F + \frac{d^2 l}{D}\left(\frac{n}{q} + p + 76{,}62v\right)}. \quad (6)$$

S étant le volume de l'eau employée pour former le volume s de vapeur, et S′ celui de l'eau qui sort de la chaudière (vapeur formée et eau qu'elle entraîne), on a, dans une locomotive,

$$S = 0{,}75S' \quad \text{ou} \quad S' = 1{,}33\,S.$$

En ayant égard aux pertes de vapeur par les soupapes de sûreté,

$$S' = 1{,}40\,S.$$

Dans une locomotive, la quantité d'eau évaporée croît proportionnellement à la racine quatrième de la vitesse de la locomotive ; ainsi, v étant la vitesse correspondant à la quantité d'eau évaporée S', et v'' celle correspondant à la quantité S'', on a

$$\frac{S'}{S''}=\frac{\sqrt[4]{v}}{\sqrt[4]{v''}},\quad \text{d'où}\quad S'=S''\sqrt[4]{\frac{v}{v''}}$$ (*Int.*, 247 et 528).

Comme à la vitesse de $v''=32$ kilomètres à l'heure on a trouvé que la quantité d'eau évaporée par heure était de $0^{m.c.},054$, c'est-à-dire de 54 litres, par mètre carré de la surface de chauffe totale T, on a

$$S''=0^{m},054\times T.$$

Par suite il vient

$$S'=0,054\times T\sqrt[4]{\frac{v}{32}}\quad \text{et}\quad S=\frac{0,054\times T\sqrt[4]{\frac{v}{32}}}{1,40}.$$

Remplaçant S par sa valeur dans la formule (6), on a

$$v=\frac{1}{1000}\times\frac{1}{q}\times\frac{l}{l+c}\times\frac{\dfrac{0,054\times T\sqrt[4]{\frac{v}{32}}}{1,40}}{(1+\delta)[(K\pm\sin\alpha)M\pm m\sin\alpha+uv^2]+F+\dfrac{d^2l}{D}\left(\dfrac{n}{q}+p+76,62v\right)}.$$

Équation de laquelle on peut tirer directement la valeur de v ; mais il vaut mieux, pour la facilité des calculs, déterminer cette valeur par tâtonnement : on substitue à v, dans le second membre de l'équation, une valeur que l'on suppose approcher de la valeur réelle, et on tire de l'équation une seconde valeur de v, plus ou moins exacte, mais s'approchant plus de la vérité que la valeur supposée ; cette seconde valeur, substituée à son tour dans le second membre de l'équation, en donne une troisième plus exacte que la seconde ; opérant sur cette troisième valeur comme sur les précédentes, on en obtient une quatrième plus exacte encore que la troisième, et en continuant ainsi de suite, on peut obtenir une valeur aussi approchée qu'on le veut de celle satisfaisant à l'équation précédente. Dans la pratique on peut considérer comme suffisamment exacte la troisième ou la quatrième valeur.

2° *Réciproquement, soit à déterminer la charge traînée par la locomotive.* Il suffit de tirer la valeur de M de l'équation (6), ce qui donne

$$M=\frac{1}{(1+\delta)(K\pm\sin\alpha)}\left[\frac{1}{1000}\times\frac{l}{l+c}\times\frac{S}{qv}-\frac{d^2l}{D}\left(\frac{n}{q}+p+76,62v\right)-F\right]-\frac{1}{K\pm\sin\alpha}(uv^2\pm m\sin\alpha).$$

455. *Règle de M. Le Chatelier pour déterminer les dimensions des machines locomotives* (chemins de fer d'Angleterre en 1851).

M. Le Chatelier a calculé, par la marche simple suivante, trois locomotives, une à grande vitesse, système Crampton, une mixte et une à marchandises; les résultats qu'il a obtenus s'accordent d'une manière très-satisfaisante avec les dimensions de machines donnant un très-bon service sur nos chemins de fer.

1° La machine devant parcourir, par exemple, 80 kilomètres à l'heure ou $22^m,22$ par seconde, comme il convient que le nombre de tours des roues motrices soit compris entre 2,5 et 3 pour toutes les locomotives, pour 2,5 tours on aura pour le diamètre D de ces roues $D = \frac{22,22}{\pi \times 2,5} = 2^m,83$, et pour 3 tours $D = 2^m,36$; il est convenable de faire $D = 2^m,50$.

2° La pression étant 7 atmosphères dans la chaudière, la pression moyenne utile dans le cylindre est 4,5 atm. pour l'admission au premier cran de la détente, en déduisant la pression atmosphérique, plus 1,5 atm. pour la contre-pression, la détente, la compression et le passage de la vapeur de la chaudière aux cylindres, soit $p = 4^k,64$ par centimètre carré pour la pression utile 4,5 atmosphères.

3° La résistance T du convoi se calcule avec la formule de M. Harding (445).

4° Pour un tour des roues motrices le travail produit par la vapeur devant être égal à celui absorbé par la résistance du convoi, on a

$$T \times \pi D = p \times \frac{4\pi d^2 l}{4}, \quad \text{d'où} \quad T = p\,\frac{d^2 l}{D}.$$

T résistance totale du convoi en kilog.;
D diamètre des roues motrices, en centimètres;
p pression moyenne utile de la vapeur dans les cylindres, en kilogrammes, sur un centimètre carré; elle est égale à $4^k,64$ dans l'hypothèse du 2° (451);
d diamètre des pistons, en centimètres;
l course des pistons, en centimètres.

Pour $T = 1920^k,64$, ce que donne la machine du 1er exemple suivant, en supposant $d = 42$, la formule précédente donne $l = 58,6$, soit 58 en nombre rond.

5° Faisant le coefficient d'adhérence des roues motrices sur le rail égal à 1/6 (453), pour $R = 1920$ kil., la charge des roues augmentée du poids de ces roues devient 11520 kil., soit 11,5 tonnes. Il convient de limiter cette charge à 10 tonnes; cependant l'excédant $1^t,5$ ne doit pas faire compliquer la machine en accouplant deux paires de roues.

6° L'examen des machines fonctionnant bien ayant montré que l'on avait, S, S', S'' exprimant en mètres carrés les surfaces de chauffe to-

tale, par le foyer et par les tubes, et d, l le diamètre et la course des pistons en décimètres,

$$\frac{S}{d^2 l} = 1 \quad \text{et} \quad \frac{S'}{S''} = \frac{1}{10}$$

comme $d^2 l = 103,48$

On a donc

$S = 103^{m.q.},48$ soit $104^{m.q.},50$

$S' = 9,41$ — $9,50$

$S'' = 94,07$ — $95,00$

Les règles précédentes fournissent les résultats du tableau suivant pour :

1° Un train *express* de huit wagons, pesant chacun 7,5 tonnes, marchant habituellement à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure, sur des rampes de $0^m,005$ par mètre. Le poids de la machine est 25 tonnes, et celui du tender chargé 12 tonnes.

2° Un train omnibus, marchant avec 16 wagons de 7,5 tonnes, à une vitesse qui n'excède pas 45 kilomètres à la montée des rampes de $0^m,005$ et 55 kilom. sur niveau ou à la descente. Le poids de la machine est 24 tonnes et celui du tender 11. Il y a deux paires de roues accouplées.

3° Un train de marchandises marchant avec 40 wagons pesant 9 tonnes chacun, à une vitesse de 30 kilom. à l'heure à la montée des rampes de $0^m,005$, et à la vitesse de 40 kilom. à la descente. Le poids de la machine est de 28 tonnes et celui du tender 12. Les trois paires de roues sont couplées.

DÉTAILS.	MACHINE		
	à voyageurs.	mixte.	à marchandises.
Poids total du convoi.	97^t	155^t	400^t
Résistance due au mouvement des véhicules — par tonne.	$11^k.84$	$8^k.27$	$5^k.60$
Résistance due au mouvement des véhicules — totale.	1148 .48	1281 .85	2240 .00
Résistance additionn. due au mécan.	287 .16	320 .46	448 .00
Résistance due à la gravité.	485 .00	775 .00	2000 .00
Résistance totale T.	1920 .64	2377 .31	4688 .00
Diamètre des roues motrices.	$2^m.50$	$1^m.78$	$1^m.30$
Charge sur les roues motrices.	$11^t.50$	$14^t.86$	$28^t.13$
Diamètre des cylindres.	$0^m.42$	$0^m.40$	$0^m.46$
Course des pistons.	0 .58	0 .57	0 .62
Surface de chauffe du foyer.	9 .50	8 .29	11 .94
Id. des tubes.	95 .00	82 .91	119 .40
Id. totale.	104 .50	91 .20	131 .34

436. *Quantités d'eau, de vapeur et de coke consommées dans une lo-*

comotive (458 et 462). D'après M. de Pambour, s' étant le poids de l'eau évaporée, y compris l'eau entraînée par la vapeur, et s étant le poids de la vapeur, non compris les pertes par les soupapes, on a $s = 0,75s'$.

Des observations et des expériences récentes font une plus large part à l'eau entraînée. Ainsi, dans les locomotives, la consommation d'eau étant de 9 à 10 kilog. par kilog. de coke consommé, comme dans les machines fixes, où l'eau entraînée est négligeable, 1 kil. de coke de très-bonne qualité ne produit que $6_k,5$ de vapeur (300), il en résulte que pour les locomotives la quantité d'eau entraînée ou condensée dans les cylindres est environ de 30 à 40 pour cent. L'expérience directe fournit encore une proportion plus considérable; ainsi des expériences faites sur le chemin d'Orléans par M. Bertera ont donné, pour les machines à voyageurs et par kilomètre parcouru, $5^k,02$ de coke brûlé, et $46^k,10$ d'eau dépensée, dont 42 pour 100 a été entraînée ou condensée; pour les machines à marchandises, ces nombres ont été respectivement 6,96, 71,17 et 52.

Le coke employé au chauffage des locomotives, pour être de bonne qualité, ne doit pas laisser plus de 6 pour 100 de résidu (cendre et schiste); il est de médiocre qualité s'il en laisse 9, et de mauvaise s'il en laisse 12 (n° 282).

457. *Stabilité des machines locomotives.* Si une machine locomotive n'était soumise qu'au mouvement régulier de translation parallèlement à l'axe de la voie, en même temps que les pièces mobiles du mécanisme restent périodiquement dans la même position relative, on dirait que la machine est stable. Dans la pratique, cette stabilité ne se réalise pas; ainsi on remarque que la machine oscille autour d'un axe vertical, et que sous l'influence de ce mouvement, appelé *mouvement de lacet*, et de celui de progression, elle avance en serpentant; elle oscille également autour d'un axe horizontal transversal à la voie, et prend ce que l'on appelle un *mouvement de galop;* elle exécute encore un *mouvement de roulis*, c'est-à-dire d'oscillation autour d'un axe parallèle à la voie; enfin elle exécute en outre, par rapport au mouvement de progression le long des rails, un mouvement relatif alternatif *d'avance et de recul*, que l'on a appelé improprement *mouvement de tangage* ou *mouvement de recul.*

Les causes de ces mouvements nuisibles au degré de stabilité d'une locomotive sont dus au mode de construction et d'entretien de la voie, ainsi qu'à celui de la locomotive, à l'inertie des pièces mobiles de la machine, et aux réactions intérieures produites par la vapeur.

Par l'augmentation de poids des rails et la forme bombée sur un rayon de $0^m,22$ à $0^m,45$ donnée au champignon on a atténué ces mouvements parasites; on les a diminués aussi par la perfection apportée dans la construction des machines, et depuis quelque temps l'usage des contre-poids appliqués sur les roues motrices, à l'opposé de la ma-

nivelle, a produit de bons effets relativement à l'influence de l'inertie des pièces mobiles de la machine.

Aujourd'hui les contre-poids sont réglés d'après une règle donnée par M. Le Chatelier en 1849. Depuis cette époque, les effets des contre-poids ont été soumis à l'analyse successivement par MM. Yvon-Villarceau, Couche et Resal. Il faut espérer que ces quatre auteurs finiront par arriver à la même solution de ce problème si complexe, afin que leurs travaux soient plus utiles à la pratique, qui a besoin d'être éclairée, et qui ne peut progresser qu'avec prudence dans une pareille innovation.

458. *Dimensions des parties principales des machines locomotives.*

Boîte à feu. Elle a la forme d'un parallélipipède rectangle. La première enveloppe est en cuivre rouge de première qualité, dont une seule feuille forme le ciel et les faces latérales. L'enveloppe extérieure est en tôle de fer; elle est réunie à l'enveloppe intérieure par des entretoises en cuivre de $0^m,02$ de diamètre, à vis sur toute leur longueur, à tête rabattue des deux côtés, et espacées de $0^m,10$ les unes des autres d'axe en axe.

Grille. La grille occupe toute la base de la boîte à feu. La hauteur de la face supérieure de la grille au-dessus de l'arête inférieure de la boîte à feu est de $0^m,12$ environ. Pour que l'air entre facilement dans le foyer, la boîte à feu doit se trouver à $0^m,35$ au moins au-dessus du sol. Le dessus de la boîte à feu est à $0^m,35$ ou $0^m,45$ au-dessous de l'arête supérieure du corps cylindrique de la chaudière, et il doit être couvert de $0^m,10$ d'eau. La porte du foyer est placée à $0^m,90$ ou $0^m,95$ au-dessus de la grille.

Les barreaux de la grille sont en fer forgé ou laminé; ils ont habituellement $0^m,10$ de hauteur au milieu; leur largeur varie de $0^m,020$ à $0^m,025$ en haut et de $0^m,010$ à $0^m,015$ en dessous. Leur écartement ne doit guère dépasser la limite de $0^m,020$ à $0^m,025$; cependant on augmente cet écartement quand le coke est impur et produit du mâchefer.

L'épaisseur du combustible sur la grille varie de $0^m,50$ à $0^m,70$. Un kilogramme de coke consomme 18 mètres cubes d'air froid (284), et produit, quand il est bon, 6 et le plus souvent 6,5 kilog. de vapeur (500 et 456).

Tubes. Les tubes étaient en cuivre rouge; mais aujourd'hui on les fait en laiton, qui est moins promptement usé par le frottement des particules de coke entraînées par la fumée. L'épaisseur d'eau qui les sépare varie de $0^m,013$ à $0^m,020$, et il convient, pour que les dépôts y adhèrent moins et que la vapeur se dégage facilement, de se rapprocher de l'écartement supérieur, qui affaiblit encore moins les plaques quand on change les tubes.

Les viroles ont $0^m,002$ d'épaisseur; elles sont en acier, et quelquefois en fer pour le côté de la boîte à fumée.

Cheminée. En France, la hauteur totale de la locomotive ne pouvant dépasser 4m,25 au-dessus du rail, la hauteur des ouvrages d'art étant de 4m 30, il en résulte que la hauteur de la cheminée proprement dite n'est que de 1m,60 à 2m,00, selon la hauteur de la chaudière (405). La cheminée est formée d'une seule feuille de tôle, et elle est garnie à la partie supérieure d'un capuchon que l'on ferme pendant les temps d'arrêt.

Roues. Aujourd'hui, le moyeu, les bras et le faux-bandage sont le plus souvent d'une seule pièce. Quand il n'en est pas ainsi, les bras sont réunis par la coulée du moyeu. La jante se place à chaud, et on la fixe sur les bras par des boulons (431).

La largeur totale de la jante est en général de 0m,14. La saillie du boudin varie de 0m,03 à 0m,04, et son épaisseur de 0m,04 à 0m,06. La machine étant placée au milieu de la voie, il y a un jeu de 0m,01 à 0m,02 entre chaque boudin et le rail, ce qui donne à la machine un jeu de 0m,02 à 0m,04.

Distance des essieux extrêmes. Le rayon minimum des courbes varie, suivant les voies, entre 300 et 1000 mètres.

Pour une vitesse maxima de 60 kilomètres à l'heure, la limite raisonnable d'écartement des essieux paraît devoir être de 3m,50 pour un rayon minimum de 600 mètres (439), ce rayon minimum pouvant être de 300 mètres à une station où on arrête toujours, et de 200 mètres sur les voies de service et les croisements. Cette limite raisonnable d'écartement est de 4 mètres, quand les rayons précédents sont respectivement 1000 mèt., 500 mèt. et 300 mèt.

La distance des essieux extrêmes doit, du reste, être plus petite pour les machines à roues accouplées que pour celles à roues libres, qui se déplacent plus facilement sur les courbes; c'est ce qui explique pourquoi, dans les machines Crampton, on a pu porter cette distance à 4m,86 pour le chemin du Nord.

Ressorts. Les ressorts sont en acier ordinaire cémenté, et quelquefois en acier fondu; dans le premier cas le nombre de feuilles varie de 17 à 22, et dans le second, de 8 à 10.

Pistons. Les pistons à vapeur ont pour garniture deux cercles superposés en bronze, en fonte et plus rarement en acier; chaque cercle a ordinairement 0m,03 de hauteur, de sorte que la garniture a 0m,06. Près de la fente, l'épaisseur des cercles varie de 0m,02 à 0m,03, et cette épaisseur va en augmentant jusqu'à l'extrémité opposée du diamètre.

Tiroirs. Les tiroirs sont en bronze, et de préférence en fonte, qui a plus de durée sans réparation, donne de plus belles surfaces frottantes, mais nécessite plus de soins de graissage.

Tuyaux à vapeur. La section intérieure des tuyaux de prise de vapeur varie de 1/10 à 1/12 de celle de chaque cylindre, et celle des tuyaux de bifurcation doit être égale à la moitié au moins de la précédente. La section du tuyau d'échappement est habituellement, pour chaque

cylindre, égale à celle du tuyau de prise de vapeur, c'est-à-dire à environ le 1/10 de l'aire du piston; si le tuyau est commun aux deux cylindres, cette section doit être doublée.

Pompes. Pour déterminer le volume des pompes alimentaires, on calcule le poids de vapeur correspondant à 4 cylindrées; on augmente ce poids calculé à l'aide de la table du n° 266 de 30 pour 100, afin de tenir compte de l'eau entraînée, et le résultat trouvé est le volume en litres que doit fournir chaque pompe par coup de piston, car une seule pompe doit pouvoir faire le service de la machine. Comme une pompe ne donne que 60 pour 100 d'effet utile, et qu'elle ne doit fonctionner que pendant le 1/3 du temps d'activité de la machine, son volume doit donc être égal à celui de l'eau à fournir multiplié par $1,5 \times 3 = 4,5$. Le diamètre du piston est habituellement de $0^m,10$, et la course de $0^m,10$ à $0^m,14$. La bielle qui commande le plongeur doit avoir au moins $0^m,40$ de longueur. Chaque pompe puise son eau dans le tender à l'aide d'un tuyau en cuivre rouge de $0^m,05$ environ de diamètre et de $0^m,003$ d'épaisseur; ce tuyau est disposé de manière à permettre les mouvements relatifs de la machine par rapport au tender. Chaque pompe a également un tuyau de refoulement en cuivre rouge de même diamètre et de même épaisseur que le tuyau d'aspiration.

Les pompes sont garnies de trois soupapes à boulet, une d'aspiration et deux de refoulement.

TABLEAU des dimensions principales de quelques machines locomotives (extrait du *Guide du Mécanicien*).

LÉGENDE.

N° 1. Ce type, établi par Sharp et Roberts, en 1840, pour le chemin de Versailles, quoique d'une puissance inférieure à celle des machines actuelles, est encore en service sur beaucoup de chemins, où la bonne disposition de toutes ses parties et sa solidité l'ont fait résister au temps.

N° 2. Ces machines ont été construites par Stéphenson, en 1843, pour le service des voyageurs sur le chemin de fer de Paris à Orléans; elles appartiennent à son premier type de machines à longues chaudières; elles sont à cylindres et à châssis intérieurs. C'est sur ces machines que la coulisse a été importée en France; elles ont toujours fait un bon service.

N° 3. Ces machines à voyageurs, du chemin de fer de Lyon, ont été construites, en 1847, d'après les plans de M. Al. Barrault, par MM. Derosne et Cail; elles ont été le point de départ de la réaction légitime qui a eu lieu contre le système des trois essieux intercalés entre la boîte à feu et la boîte à fumée de R. Stéphenson. Le diamètre des roues motrices et la répartition du poids sont très-convenables. Le réservoir de vapeur manque de capacité et surtout de hauteur dans le corps cylindrique de la chaudière; elles priment avec une grande facilité.

N° 4. Ce type a été construit en 1849, par MM. Derosne et Cail, sur les plans d'ensemble de M. Crampton, pour le service des trains *express* du chemin de fer

du Nord. Tout le monde paraît à peu près d'accord sur la nécessité de réduire leur poids et la distance des essieux extrêmes; on peut, sans inconvénient, réduire la surface de chauffe dans une proportion assez notable. Le mécanisme de la distribution est entièrement placé à l'extérieur.

N° 5. Ces machines *mixtes*, du chemin de fer de l'Ouest, ont été construites, en 1848, par M. Cavé, d'après un type spécial que M. E. Gouin avait étudié en 1847. Les cylindres et le châssis sont intérieurs, et les roues motrices sont accouplées avec les roues d'arrière, qui sont placées en avant du foyer. Ces machines, à part une certaine propension à l'entraînement de l'eau, résultant de l'insuffisance de la hauteur du réservoir de vapeur dans le corps cylindrique de la chaudière, sont dans de bonnes conditions; elles sont parfaitement appropriées au service du chemin de fer de l'Ouest, dont le profil, entre Paris et Chartres, présente, sur un quart de sa longueur, des pentes et rampes de 0m,006 à 0m,010 par mètre, et dont les convois sont formés par la réunion de voitures à voyageurs et de wagons à marchandises.

N° 6. Ces machines *mixtes*, du chemin de fer de Lyon, ont été construites, en 1849, par M. E. Gouin, d'après les plans de MM. Sharp frères. Les cylindres sont intérieurs et inclinés, pour que les tiges des pistons et les glissières puissent passer au-dessus de l'essieu des roues d'avant, qui sont accouplées avec les roues du milieu. Ces machines ont une grande surface de chauffe et un grand réservoir de vapeur; elles font un excellent service. Quelques-unes de ces machines ont été montées sur des roues de 1m,80 de diamètre.

N° 7. Ce sont des *machines à marchandises* construites en 1849 par M. C. Polonceau dans les ateliers du chemin d'Orléans. Le diamètre de leurs roues permet de les affecter au service des voyageurs. Les cylindres sont intérieurs et les boîtes du tiroir extérieures, de telle sorte que le mécanisme de la distribution est compris entre les roues et le châssis extérieur. Les bielles d'accouplement sont appliquées sur des manivelles en fer forgé, calées sur le prolongement des fusées, au delà du châssis extérieur. Ces machines sont dans de très-bonnes conditions de stabilité, de vaporisation et d'économie de vapeur. Le faible écartement des roues extrêmes, obtenu sans inconvénient en donnant du porte-à-faux aux cylindres en avant du premier essieu, atténue l'inconvénient qui résulte de l'accouplement des roues motrices avec les roues d'arrière.

N° 8. Ces *machines à marchandises*, du chemin de Strasbourg, ont été établies, en 1850, par MM. Derosne et Cail, d'après le type de celles sorties en 1845 des ateliers de Stépheoson pour le chemin d'Orléans. Les cylindres sont intérieurs et les six roues sont accouplées et placées entre la boîte à feu et la boîte à fumée. Ces machines sont susceptibles de faire un très-bon service, et leur modèle est généralement adopté aujourd'hui lorsqu'on accouple les six roues.

DÉTAILS.	NUMÉRO	1	2	3	4	5	6	7	8
	CHEMIN	Versailles.	Orléans	Lyon.	Nord	Ouest	Lyon	Orléans.	Strasbourg.
	SERVICE	Voyageurs.	Voyageurs.	Voyageurs.	Grampton	Mixte.	Mixte.	Marchand	Marchand.
	DATE de la construction.	1849	1843	1847	1849	1848	1849	1849	1850
Boîte à feu.									
Longueur de la grille		m. 1.028	m. 0.925	m. 1.050	m. 1.370	m. 1.000	m. 1.203	m. 0.922	m 1.050
Largeur id.		1.018	0.919	0.900	1.018 1.040	0.920	1.042	1.072	0.904
Surface id.		1.046	0.851	0.945	1.418	0.920	1.253	0.988	0.049
Hauteur du 1er rang de tubes au-dessus de la grille		0.530	0.566	0.097	0.560	0.680	0.870	0.555	0.738
Hauteur du c.el du foyer au-dessus de la grille		1.168	1.400	1.350	1.313	1.280	1.505	1.220	1.350
Chaudière.									
Nombre de tubes		102	160	145	178	145	155	180	143
Longueur des tubes		2.550	3.680	3.488	3.615	3.920	3 220	3.700	3 927
Diamètre intérieur des tubes		0.039	0.037	0.046	0.047	0.045	0.046	0.043	0.045
Épaisseur des tubes		0.002	0 002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Surface totale des tubes		50.012	63.300	76.250	94.962	80.330	77.600	90.396	82.910
Id. du foyer		5.868	5.090	5.900	7.377	5.500	7.860	6.252	5.810
Id. de chauffe totale		55.880	68.390	82.150	102.339	85.830	85.460	96.648	88.720
Écartement moyen intérieur des 2 enveloppes du foyer		0.080	0 076 0.071	0.076 0.126	0.066 0.077	0.077	0.079 0.070	0.100	0.076 0.106
Diamètre int. du corps cylindrique		1.115	0.982 0.921	1.036 1.076	1.200	1.060	1.146	1.270	1.190
Longueur id.		2.434	3.564	3.410	3.550	3.845	3.100	3.620	3.850
Épaisseur de la tôle		0.010	0.010	0.012	0.010	0.010	0.012	0.011	0.011
Id. de la tôle de la boîte à feu extérieure		0.010	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012	0.012	0.012
Id. du cuivre du ciel du foyer		0.010	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Id. du cuivre des parois latérales		0.010	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Id. du cuivre de la plaque des tubes		0.020	0.022	0.022 0.012	0.025 0.012	0.025	0.025 0.014	0.024	0.023 0.012
Pour 0m,10 d'eau au-dessus du foyer — Volume d'eau contenu dans la chaudière		1.615	1.754	2.300	2.779	2.536	2.000	3.060	2.370
Volume de vapeur id.		1.195	0.824	0.928	0.613	1.326	1.540	1.120	1.450
Distance de l'eau à l'arête supérieure du corps cylindrique		0.350	0.205	0.206	0.245	0.270	0.326	0.350	0.365

Boîte à fumée.								
Longueur intérieure	0.634	0.820	0.623	0.675	0.822	0.762	0.800	0.805
Largeur	1.250	1.120	1.244	1.200	1.234	1.304	1.400	1.106
Hauteur	1.740	1.120	1.200	1.200	1.100	1.367	1.305	ronde.
Capacité (moins le volume des cylindres)	0.960	1.018	0.754	0.703	1.000	0.808	1.237	0.805
Épaisseur de la plaque des tubes	0.016	0.015	0.017	0.015	0.015	0.016	0.016	0.017
Épaisseur des parois latérales	0.007	0.000	0.008	0.010	0.008	0.006	0.008	0.010
Cheminée.								
Diamètre intérieur	0.350	0.330	0.380	0.400	0.330	0.400	0.400	0.400
Épaisseur de la tôle	0.003	0.004	0.003	0.003	0.005	0.004	0.004	0.003
Hauteur au-dessus de la boîte à fumée	1.080	1.025	1.820	1.950	1.705	1.017	1.065	1.570
Alimentation.								
Diamètre des plongeurs	0.045	0.107	0.050	0.064	0.105	0.052	0.105	0.105
Course *id.*	0.464	0.114	0.600	0.550	0.116	0.500	0.140	0.110
Volume engendré par coup de piston, en décim. cub.	0.730	1.025	1.274	1.760	1.004	1.180	1.210	1.004
Diamètre cylindrique des siéges des clapets	0.038	0.060	0.050	0.060	0.045	0.048	0.000	0.052
Levée des soupapes	0.024	0.020	0.016	0.012	0.012	0.012	0.010	0.012
Section d'écoulement par les soupapes	0.00113	0.0016	0.00176	0.0010	0.0011	0.00118	0.0010	0.001356
Diamètre des tuyaux d'aspiration	0.040	0.050	0.052	0.064	0.045	0.052	0.055	0.052
Id. de refoulement	0.040	0.050	0.052	0.064	0.045	0.054	0.055	0.052
Épaisseur des tuyaux	0.004	0.003	0.0025 / 0.003	0.003	0.003	0.0025	0.0025	0.0025 / 0.003
Prise de vapeur.								
Section d'ouverture maxima du régulateur	0.0130	0.0125	0.0132	0.0132	0.0132	0 134	0.0105	0.0132
Diamètre intérieur du tuyau de prise de vapeur	0.120	0.125	0.125	0.145	0.125	0.138	0.115	0.125
Épaisseur *id.*	0.004	0.004	0.003	0.0025	0.003	0.010	0.0013	0.012
Diamètre des tuyaux allant aux cylindres	0.090	0.087	0.100	0.120	0.100	0.138	0.100	0.100
Échappement.								
Diamètre du tuyau d'échappement	0.100	0.060	0.140	0.160	0.115	0.230 / 0.080	0.130	0.110
Section maxima de la tuyère échappement	0.0100	0.0120	0.01595	0.0220	0.0103	0.01375	0.01474	0.011309
Section minima *id.*	0.0040	0.0023	0.0031	0.0025	0.0025	0.00472	0.0027	0.00386
Longueur totale de la cond. d'échappement depuis le tiroir	1.950	1.400	2.100	2.425	1.500	1.882	2.150	1.000
Épaisseur des tuyaux d'échappement	0.004	0.003	0.003	0.003	0.005	0.008	0.003	0.003

DÉTAILS.		1	2	3	4	5	6	7	8
	NUMÉRO	1	2	3	4	5	6	7	8
	CHEMIN	Versailles.	Orléans.	Lyon	Nord.	Ouest	Lyon.	Orléans.	Strasbourg.
	SERVICE	Voyageurs	Voyageurs.	Voyageurs	Crampton.	Mixte.	Mixte	Marchand	Marchand.
	DATE de la construction.	1840	1843	1847	1849	1848	1849	1849	1850
Distribution.									
Angle d'avance.		30°	av. 30° 3/5 ar. 36° 3/6	30°	15°	30°	33°	av. 21° ar. 10°	30°
		m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
Avance linéaire à l'introduction.		0.006	»	0.005	0.004	0.005	0.0065	0.002	0.005
Id. à l'échappement.		0.027	0.016	0.028	0.032	0.030	0.000	0.035	0.028
Recouvrement intérieur de chaque côté.		0.003	0.0068	0.001	0.0068	0.0055	0.001	0.005	0.001
Id. extérieur *id.*		0.023	0.0315	0.024	0.028	0.023	0.021	0.025	0.024
Maxima d'introduction de vapeur, la course étant 1.		0.808	0.760	0.790	0.800	0.820	0.770	0.700	0.700
Minima *id.*		»	0.320	0.250	0.250	0.250	0.260	0.180	0.250
Rayon d'excentricité.		0.048	0.057	0.058	0.092	0.058	0.065	0.070	0.058
Course des tiroirs.		0.115	0.114	0.116	0.184	0.116	0.103	0.100	0.116
Lumière d'admission.	Longueur.	0.192	0.2535	0.300	0.300	0.250	0.305	0.320	0.250
	Largeur.	0.044	0.033	0.040	0.050	0.040	0.046	0.038	0.040
	Section.	0.00836	0.00835	0.012	0.015	0.010	0.014	0.012	0.010
Longueur développée du conduit d'admission.		0.250	0.320	0.380	0.400	0.275	0.310	0.360	0.320
Volume du conduit d'admission.		0.00209	0.00267	0.0045	0.006	0.00275	0.00434	0.0043	0.0032
Lumière d'échappement.	Longueur.	0.102	0.2535	0.300	0.300	0.250	0.305	0.320	0.250
	Largeur.	0.070	0.060	0.080	0.000	0.075	0.086	0.073	0.076
	Section.	0.01344	0.015	0.024	0.027	0.01875	0.026	0.02336	0.010
Tiroirs.	Longueur.	0.270	0.228	0.248	0.286	0.243	0.262	0,243	0.244
	Largeur.	0.260	0.3155	0.358	0.360	0.200	0.365	0.370	0.314
	Surface.	0.0702	0.0719	0.08378	0.1029	0.073	0.0056	0.0800	0.0766
Transmission.									
Écartement d'axe en axe des cylindres.		0.713	0.752	1.882	1.850	0.750	0.670	1.020	0.750
Inclinaison des cylindres.		0°	0°	0°	0°	0°	5°	0°	7°
Diamètre *id.*		0.330	0.355	0.380	0.400	0.380	0.400	0.440	0.380
Longueur totale intérieure.		0.600	0.666	0.732	0.682	0.680	0.692	0.731	0.735
Course des pistons.		0.460	0.510	0.600	0.550	0.560	0.560	0.600	0.610

Liberté moyenne des cylindres	0.010	0.020	0.011 / 0.013	0.020	0.021	0.014 / 0.011	0.020	0.016 / 0.008
Longueur de la bielle	1.425	1.294	1.010	2.310	1.400	1.670	1.450	1.550
Diamètre du bouton de la manivelle	0.150	0.155	0.085	0.125	0.160	0.165	0.180	0.160
Longueur *id.*	0.090	0.102	0.100	0 120	0.100	0.096	0.110	0.102
Châssis.								
Écartement des longerons d'axe en axe	1.810	1.220	1.210	1.282 / 2.418	1.225	1.260	2.080	1.226
Hauteurs des longerons	0.240	0.117	0.200	0.220	0.200	0.260 / 0.340	0.230	0.200
Épaisseur de la tôle	0.010	0.025	0.030	0.025	0.030	0.026	0.008	0.030
Id. du bois	0.070	0.022	»	»	»	»	0.064	»
Hauteur de l'axe des tampons au-dessus des rails	0.880	1.055	0.980	0.950	1.000	0.980	1.020	0.990
Écartement des tampons d'axe eu axe	1.800	1.800	1.710	1.727	1.740	1.710	1.740	1.710
Ressorts.								
Ressorts de l'essieu du milieu. — Longueur	0.778	0.930	0.950	0.966	1.010	0.710	0.925	0.860
— Largeur	0.100	0.085	0.090	0.100	0.090	0.090	0.090	0.090
— Hauteur au milieu	0.125	0.152	0.179	0.115	0.190	0.140	0.108	0.103
— Flèche sous charge	0.100	0.050	0.075	0.115	0.025	0.060	0.082	0.045
Ressorts de l'essieu d'avant. — Longueur	0.778	0.950	0.950	0.966	1.010	0.710	0.950	0.860
— Largeur	0.100	0.088	0.000	0.100	0.096	0.090	0.090	0.090
— Hauteur au milieu	0.118	0.135	0.170	0.150	0.180	0.140	0.144	0.108
— Flèche sous charge	0.100	0.0[illegible]8	0.070	0.172	0.029	0.060	0.070	0.045
Ressorts de l'essieu d'arrière. — Longueur	0.675	0.950	0.976	0.966	1.010	1.200	0.925	0.860
— Largeur	0.074	0.088	0.060	0.100	0.090	0.105	0.090	0.090
— Hauteur au milieu	0.070	0.150	0.190	0.150	0.190	0.170	0.120	0.108
— Flèche sous charge	0.000	0.050	0.070	0.172	0.025	0.158	0.082	0.045
Roues et essieux.								
Diamètre des roues. — du milieu	1.660	1.700	1.800	1.220	1.600	1.600	1.500	1.420
— d'avant	1.050	1.102	1.100	1.350	1.100	1.600	1.000	1.420
— d'arrière	1.050	1.102	1.100	2.100	1 600	1.100	1.500	1.420
Essieu du milieu. — Diamètre de la fusée	0.102	0.152	0.165	0.180	0 160	0.165	0.140	0.165
— Longueur *id.*	0.144	0.153	0.160	0.250	0.152	0.170	0.170	0.150
— Diamètre à la portée de calage	0.165	0.177	0.185	0.190	0.178	0.180	0 176	0.180
— Diamètre au milieu	0.152	0.146	0.160	0.150	0.152	0.160	0.170	0.155
Essieu d'avant. — Diamètre de la fusée	0.087	0.127	0.100	0.150	0.145	0.105	0.120	0.200
— Longueur *id.*	0.150	0.178	0.180	0.300	0.180	0.180	0.190	0.180
— Diamètre à la portée de calage	0.127	0.147	0.180	0.230	0.160	0.186	0.101	0.180
— Diamètre au milieu	0.108	0.129	0.145	0.160	0.135	0.155	0.140	0.150

DÉTAILS.		1	2	3	4	5	6	7	8
	NUMÉRO	1	2	3	4	5	6	7	8
	CHEMIN	Versailles.	Orléans.	Lyon.	Nord.	Ouest.	Lyon.	Orléans.	Strasbourg.
	SERVICE	Voyageurs.	Voyageurs.	Voyageurs.	Crampton.	Mixte.	Mixte.	Marchand.	Marchand.
	DATE de la construction.	1840	1843	1847	1849	1848	1849	1849	1850
		m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
Essieu d'arrière	Diamètre de la fusée	0.087	0.118	0.160	0.180	0.100	0.130	0.140	0.100
	Longueur *id.*	0.150	0.160	0.180	0.260	0.180	0.150	0.100	0.180
	Diamètre à la portée de calage.	0.127	0.146	0.180	0.210	0.178	0.150	0.176	0.180
	Diamètre au milieu	0 108	0.120	0 145	0.172	0.146	0.125	0.145	0.150
Écartement intérieur des roues		1.360	1.375	1.360	1.355	1.365	1.300	1.370	1.355
Id. intérieur des rails		1.440	1.400 / 1.450	1.450	1.440	1.450	1.450	1.440 / 1.450	1.440
Id. des essieux extrêmes		3.444	3.338	4.015	4.800	3.440	4.230	3.125	3 350
Id. des deux essieux d'avant		1.824	1.858	1.800	2.300	1.740	2.215	1.545	1.845
Bandages	Largeur	0.135	0.128 / 0.100	0.140	0.140	0.140	0.140	0.135	0.140
	Épaisseur au milieu	0.040	0.050	0.050	0.055	0.050	0.050	0.050	0.050
	Saillie du boudin	0.025	0.025	0.040	0.039	0.038	0.030 / 0.040	0.033	0.040
	Conicité sur le rail	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20
***Poids* (en kilogrammes).**			k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
Essieu du milieu monté		»	2445	2000	1554	2324	2155	1963	2090
Id. d'avant *id.*		»	995	1300	1707	1105	1880	1135	1811
Id. d'arrière *id.*		»	995	1300	3185	2112	1095	1908	1811
Machine chargée avec 15 e. d'eau	Poids sur l'essieu du milieu	»	6810	9312	3337	8400	8904	8065	0551
	Id. d'avant	»	2335	8087	9370	0100	7217	0140	0551
	Id. d'arrière	»	5100	2014	8100	3000	4175	6660	0551
	Poids total de la machine	»	19190	25213	27319	23041	25426	25805	25365
Poids total de la machine vide		»	10750	22000	24197	20500	22080	22400	22200
Tender.									
Poids d'eau complet		»	4520	0000	6390	4000	5500	4520	5000
Poids de coke		»	1350	1500	1225	1800	1000	2475	2000
Poids vide avec agrès		»	4870	11826	9951	8000	8900	4870	8720
Poids plein		»	10740	19326	17506	13800	15400	11865	15720

459. *Machines-tenders.* Extrait du cahier des charges pour la fourniture de 30 machines mixtes portant leur eau et leur coke, par M. E. Gouin, à la compagnie des chemins de fers du Midi.

Les machines sont à bâtis intérieurs, cylindres extérieurs, distribution et alimentation extérieures; elles sont à six roues, dont les quatre d'arrière accouplées. L'eau et le coke sont placés dans une caisse particulière dont la plus grande partie se trouve à l'arrière de la boite à feu.

Poids de la machine vide		27 400	kilog.
Id. la machine et le tender remplis d'eau et de coke		35 000	
Id. de l'eau contenue dans la caisse du tender		3 600	
Id. du coke *id.* (remplie à ras)		1 000	
Au départ.	Poids sur les roues d'avant	10 500	
	Id. du milieu	13 000	
	Id. d'arrière	11 500	
Mach. pleine et tender vide.	Poids sur les roues d'avant	12 000	
	Id. du milieu	10 500	
	Id. d'arrière	8 000	
Diamètre des roues accouplées (roues motrices)		1m,740	
Écartement des roues d'avant aux roues du milieu		2 ,300	
Id. des roues du milieu aux roues d'arrière		2 ,400	
Id. total des roues d'avant aux roues d'arrière		4 ,700	
Diamètre des cylindres		0 ,420	
Course des pistons		0 ,560	
Diamètre intérieur du corps cylindrique		1 ,256	
Surface de chauffe directe, ou de la boite à feu		7 ,150	
Surface de chauffe des tubes		91 ,000	
Surface de chauffe totale		98 ,150	
Longueur des tubes		3 ,500	
Diamètre extérieur des tubes		0 ,050	
Nombre de tubes		180	
Longueur moyenne du foyer		1 ,250	
Largeur moyenne du foyer		1 ,036	
Hauteur du dessus de la grille au ciel du foyer		1 ,500	

Les trente machines seront rigoureusement identiques entre elles; une pièce quelconque devra pouvoir s'adapter indistinctement à l'une des trente machines, sans qu'il soit nécessaire d'y retoucher en aucune manière.

Tous les écrous en fer forgé susceptibles d'être souvent manœuvrés seront cémentés et trempés à l'extérieur.

Les roues seront entièrement en fer forgé, y compris le moyeu; le fer employé pour la construction de la roue proprement dite devra provenir de fonte au bois de bonne qualité

Les moyeux seront composés de la réunion de tous les rayons et de deux galettes ou plateaux, l'un intérieur, l'autre extérieur; ils pourront aussi, si le constructeur dispose de moyens assez puissants, être obtenus au pilon d'un seul paquet de fer avec les amorces des rayons.

Le soudage par encolage ne pourra être employé pour souder les rayons sur la jante; les différentes parties de la jante elle-même seront soudées au moyen de coins.

Le diamètre de la jante des roues couplées après tournage, pour application de bandage, est fixé à la cote rigoureuse de 1m,630; le diamètre de roulement de ces roues sera donc de 1m,740.

Pour les roues d'avant, le diamètre de la jante tournée est fixé à la cote rigoureuse de 0m,99, ce qui donne 1m,10 pour le diamètre de roulement.

Les bandages seront montés sur les roues avec un serrage de 0m,0015 pour les roues accouplées, et de 0m,001 pour les roues d'avant.

Les manivelles des essieux accouplés seront disposées de manière que la manivelle de gauche étant verticale et au-dessus de l'essieu, la manivelle de droite soit horizontale et en avant.

Les essieux ne devront présenter aucun raccordement à vives arêtes.

Les arrêts de calage seront eux-mêmes raccordés par des congés ayant pour rayons la saillie des arrêts.

Les fusées seront martelées à petits coups avec des marteaux pesant au plus 500 grammes, pour durcir la partie frottante; cette opération devra précéder un dernier coup de plane destiné à enlever les petites bosses que laissera le marteau.

Les boutons d'accouplement seront en fer cémenté et trempé.

Le montage des roues sur les essieux et des boutons de manivelles sur les roues sera fait à la presse hydraulique, et l'on devra, tout en prenant les précautions d'usage, employer une pression minima, pour les faire entrer, de 40 000 kilog. pour les roues, et de 20 000 kilog. pour les boutons. Tout calage qui serait obtenu par des pressions moindres serait un motif de refus des roues montées.

L'écartement intérieur des bandages sera rigoureusement de 1m,360 pour les roues extrêmes, et de 1m,368 pour les roues du milieu.

Le clavetage sur les essieux sera fait au moyen d'une clef en acier ordinaire, de 0m,050 de largeur et 0m,025 de hauteur.

Les contre-poids à placer sur les roues pour équilibrer les pièces mobiles seront calculés d'après la théorie de M. Le Chatelier, en plaçant les masses le plus près possible de la circonférence de la roue, dans le but de diminuer les poids.

Les coussinets seront montés sans aucun jeu sur les fusées et seront en bronze de 82 de cuivre pour 18 d'étain.

Dans le montage des boites à graisse, le constructeur devra laisser entre la plaque de garde et la boite à graisse un jeu de 0m,03 en dessus et de 0m,03 en dessous, pour les oscillations du ressort.

Le parallélisme des essieux ne pourra, dans aucun cas, être obtenu par des inégalités d'épaisseur, soit dans les glissières, soit dans les boites; les boites seront d'ailleurs parfaitement symétriques par rapport à l'axe des essieux.

Les glissières des boites à graisse seront en fonte, rivées après les longerons.

Chacun des quatre systèmes de glissières des roues couplées portera un coin de serrage. Ce coin sera en fer cémenté et trempé.

Les tiges de suspension seront attachées à des oreilles en fer forgé, fixées aux longerons.

Dans le taraudage de ces tiges, en approchant du corps lisse, on aura soin de diminuer graduellement la profondeur du filet dans le but de rendre ces tiges moins sujettes à rupture.

La douille des tiges de suspension sera cémentée et trempée, ainsi que les boulons d'articulation.

Les ressorts de suspension seront en acier fondu, de 0m,090 de largeur; la distance des pointes de suspension sera de 0m,65 pour les ressorts des roues extrêmes, et de 1m,00 pour les roues du milieu.

Toutes les feuilles d'un même ressort seront rigoureusement cintrées sur le même rayon de fabrication.

La flexion par 1000 kilog. de charge sera à peu près la même pour les ressorts d'avant et d'arrière; elle atteindra approximativement 0m,005.

Pour les ressorts du milieu, la flexion par 1000 kilog. de charge sera d'environ 10 millimètres.

Les longerons des bâtis seront en fer forgé, martelé et fini au laminoir, et d'une seule pièce avec les plaques de garde.

La traverse d'avant sera en bois de chêne de choix, garnie d'une tôle d'armature de $0^m,008$ d'épaisseur ; elle recevra deux tampons en caoutchouc à quatre rondelles, et un crochet à trois rondelles en caoutchouc, avec tendeur.

La traverse d'arrière, en bois de chêne armé d'une tôle, portera des tampons en caoutchouc à cinq rondelles, un crochet d'attelage à cinq rondelles en caoutchouc, avec tendeur et deux chaînes de sûreté.

La chaudière sera de même système que celles des dernières machines Crampton, livrées à la compagnie des chemins de fer du Nord par M. Cail ; l'épaisseur de la tôle sera de $0^m,011$.

Le corps cylindrique aura $1^m,256$ de diamètre intérieur et contiendra 180 tubes de $3^m,50$ de longueur de dehors en dehors des deux plaques tubulaires.

L'ensemble de la chaudière sera enveloppé de douves en bois de chêne de 16 millimètres d'épaisseur, assemblées à rainures et languettes. Ces douves seront recouvertes de feuilles de tôle de 3/4 de millimètre d'épaisseur, retenues par des cercles en tôle.

La prise de vapeur sera celle des machines Crampton, en élevant, autant que possible, le tuyau fendu, et en faisant le joint contre la boîte du régulateur.

Les fentes devront être garnies de bords relevés, pour s'opposer le plus efficacement possible à l'entraînement de l'eau.

Les robinets réchauffeurs, de vidange, de retenue, des manomètres, seront conformes aux dessins remis aux constructeurs. Tous les boisseaux de robinets seront en bronze de 86 de cuivre pour 14 d'étain, et les clés, les écrous, les rondelles, en bronze de 90 de cuivre pour 10 d'étain.

La machine sera garnie d'un manomètre métallique à diaphragme Bourdon. A cet effet, la cuvette des soupapes portera un raccord semblable à celui employé actuellement dans les ateliers de la compagnie du Nord.

Les tubes seront en laiton avec soudure ou sans soudure, ils auront $0^m,002$ d'épaisseur sur $0^m,050$ de diamètre extérieur, et pèseront $3^k,09$ par mètre courant. Avant la pose, ils seront essayés à la presse hydraulique, à la pression de quarante atmosphères ; ils seront espacés de $0^m,065$ d'axe en axe ; il n'y aura des viroles que dans la boîte à feu ; elles seront en acier de $0^m,0025$ d'épaisseur ; elles présenteront comme les trous des plaques tubulaires une conicité de 1/40.

La cheminée ne pourra présenter aucune partie s'élevant au delà de $4^m,20$ au-dessus du rail ; elle sera garnie du côté gauche d'une prise d'air pour modérer le tirage, et d'un capuchon en forme de 8, portant d'un côté une plaque et de l'autre une grille pour arrêter les flammèches.

Le pavillon du haut sera en cuivre rouge de $0^m,002$ d'épaisseur et le corps de la cheminée en bonne tôle puddlée de $0^m,004$.

Les cylindres seront en fonte grise dure, à grain serré ; ils devront présenter des surfaces parfaitement rabotées dans les parties par lesquelles ils s'assemblent, soit avec les longerons, soit avec l'appendice de la boîte à fumée.

La masselotte de fusion sera au moins de $0^m,40$ de hauteur pour assurer la bonne qualité de la fonte.

Les tables des tiroirs seront rapportées, afin de faciliter les réparations ; elles seront en bronze de 80 de cuivre pour 20 d'étain.

Les couvercles seront disposés de manière que le piston étant arrivé à la fin de sa course, il y ait un jeu absolu de $0^m,006$ en avant et $0^m,008$ en arrière.

Pour vérifier en service le maintien rigoureux de ce jeu aux fins de course, l'indication des fonds de cylindres sera portée sur les glissières par un trait parfaitement gravé, en correspondance avec un trait semblable sur l'axe transversal des coulisseaux.

Les tiges des pistons seront en acier fondu, les clavettes et les ressorts en général seront en acier fondu.

Les têtes de pistons seront en fer cémenté et trempé ; elles seront garnies de

coulisseaux rapportés en fonte de même nature que celle des cylindres, et montées sur tourillons.

Le bouton de connexion de la tête de bielle à la tête de piston est fixé dans la tête de piston.

Les glissières des têtes de pistons seront en acier fondu; elles s'assemblent d'un bout aux couvercles des cylindres, et de l'autre au support évidé, qui reçoit en même temps les pompes et l'axe de la pièce de suspension des tiges de tiroirs.

Chaque glissière supérieure portera deux godets graisseurs.

Le système do clavetage des bielles d'accouplement est disposé de telle sorte qu'un serrage égal des clavettes ne change pas la longueur des bielles.

Les têtes de bielles motrices et d'accouplement, le bouton de connexion et les têtes de clavettes seront cémentés et trempés en paquet.

Tous les tourillons et boulons d'articulation du mécanisme de transmission de mouvement aux tiroirs seront cémentés et trempés, de même que l'axe de rotation de cette pièce, venu avec la pièce.

La coulisse et les coulisseaux de détente variable seront également en fer cémenté et trempé.

Les œils de barres d'excentriques, ceux de la pièce de suspension des tiges do tiroirs, des tiges de suspension des coulisses, seront garnis de bagues en fer cémenté et trempé. Ces bagues seront posées à chaud, avec beaucoup de soin, trempées immédiatement, puis rodées.

Les colliers d'excentriques seront en bronze de 84 de cuivre pour 16 d'étain.

Les pompes alimentaires et leurs chapelles seront en fonte douce, grise.

Les boulets et les sièges seront en bronze de 80 de cuivre pour 16 d'étain.

Tous les tuyaux d'aspiration et de refoulement seront en cuivre rouge de 0m,003 d'épaisseur; la croisure des pinces sera égale à quatre fois l'épaisseur du cuivre; ces tuyaux seront essayés à la presse hydraulique, à une pression de 12 atmosphères, avant la pose.

Tous les raccords des tuyaux en général seront faits d'après les types remis au constructeur; ils seront en laiton de 90 de cuivre pour 10 de zinc.

Il y aura deux tuyaux réchauffeurs, indépendants; ils seront également en cuivre rouge, mais de 0m,002 d'épaisseur seulement; ils seront essayés à la presse hydraulique, avant la pose, avec une pression de 12 atmosphères.

La croisure sera toujours égale à quatre fois l'épaisseur.

Toutes les tôles de la caisse à eau et à coke proprement dite, excepté celles des fonds supérieur et inférieur, auront 0m,003 d'épaisseur, celle du fond supérieur aura 0m,005, celle du fond inférieur 0m,004.

Tous les panneaux entrés entrant dans la composition de la caisse à eau et à coke, ainsi que les coffres des caissons, seront en bonne tôle provenant de fonte au bois.

Les autres parties de la caisse pourront être en tôle puddlée provenant de fonte au coke.

Toutes les cornières proviendront de fonte au bois et seront de la meilleure qualité.

L'écartement des rivets sera de centre en centre de 0m,03, et le diamètre du rivet employé de 0m,01.

La réception définitive ne se fera qu'après un parcours effectué de six mille kilomètres en service ordinaire, lequel devra être fait dans un délai de quatre mois, sauf le cas de grandes réparations nécessitées par des vices de construction ou de matières.

460. *Poids des machines locomotives.* Pour des machines à 6 roues pour voyageurs, le poids de 21 tonnes, y compris le poids de l'eau et du coke, paraît convenable; l'essieu d'arrière, ou celui du milieu si

les roues motrices sont à l'arrière, ne portent que 5 tonnes, celui d'avant 7 tonnes, et celui moteur 9 tonnes, y compris le poids des roues elles-mêmes ; le poids des rails est supposé de 37 à 38 kil., et le nombre des traverses 4 pour une longueur de 4m,50. Pour le même chemin, les machines à marchandises peuvent peser 22 à 23 tonnes ou 25 à 26 tonnes, selon qu'elles sont à 4 ou à 6 roues accouplées, et que la charge est également répartie sur les deux essieux principaux dans le premier cas, et à peu près uniformément répartie dans le second. Ces machines peuvent encore voyager sur des rails de 30 kilog.; mais au-dessous de cette limite il faudrait ajouter une 5e traverse par rail.

Des machines construites par M. Buddicom pour divers chemins, et entre autres celui du Havre, ne pèsent pas vides plus de 14850 kilog.

Les tenders doivent être aussi légers que possible; ceux du chemin de Rouen, pouvant contenir 3500 litres d'eau et une tonne de coke ne pèsent pas vides plus de 4 tonnes.

Une machine-tender, dont le poids serait à peu près uniformément répartie sur les trois essieux pourrait peser jusqu'à 25 tonnes.

TABLEAU des poids des diverses matières contenues dans la machine à voyageurs du chemin de fer du Nord, d'après MM. Valério et de Brouville.

MATÉRIAUX.	CHASSIS et supports.	MÉCANISME.	CHAUDIÈRE.	TOTAL.
	k.	k.	k.	k.
Fonte.	1237.0	2434.0	42.0	3713.0
Fer forgé.	4769.9	974.7	1625.4	7370.0
Tôle.	1322.5	»	2995.8	4318.3
Acier.	440.0	150.5	15.1	605.6
Cuivre rouge.	»	124.0	786.8	910.8
Laiton.	6.0	3.6	1437.5	1447.1
Bronze.	81.6	405.6	258.6	745.7
Bois et divers. . . .	335.5	17.5	138.5	491.5
Totaux. . . .	8192.5	4109.9	7299.7	19602.1

461. *Prix des machines locomotives.* Le prix le plus habituel des machines locomotives varie de 2 fr. à 2 fr. 10 le kilog.

Cinq machines à marchandises, que M. C. Polonceau a fait construire ensemble dans les ateliers du chemin d'Orléans, et dont les dimensions sont données dans le tableau page 576, sont revenues à 47259 fr. pièce.

Une machine sans son tender coûte environ 50000 fr.; elle fait au maximum et en moyenne 20 000 kilom. par an, et après un parcours de 300 000 kilom., il est nécessaire de la remplacer ou de la reconstruire à neuf. Dans l'un ou l'autre de ces cas, la perte est d'environ 30000 fr., dé-

duction faite de la valeur des vieux matériaux vendus ou rentrant dans la construction nouvelle.

462. *Alimentation de la chaudière et du foyer*. Chaque machine est munie de deux pompes alimentaires dont chacune est capable de fournir autant et plus d'eau qu'en exige la vaporisation, afin que le mécanicien ait la faculté de maintenir à un point convenable le niveau de l'eau dans la chaudière (456 et 458). Un robinet permet de régler l'arrivée de l'eau aux pompes.

Un tube en verre placé en arrière sur la boîte à feu indique le niveau de l'eau. De l'eau seule devrait s'échapper en ouvrant le robinet indicateur placé le plus bas, c'est-à-dire à $0^m,025$ ou $0^m,030$ au-dessus du sommet de la boîte à feu. Le robinet du milieu devrait donner de l'eau seule pendant la marche, et de l'eau mélangée de vapeur dans les moments d'arrêt.

La consommation d'eau augmente avec la vitesse, non-seulement parce que la puissance de vaporisation augmente, mais aussi à cause de la plus grande quantité d'eau entraînée mécaniquement.

Des expériences faites en Angleterre ont donné les résultats suivants :

1re *Expérience.*

Poids de la machine.	21678 kilog.
Id. du tender.	13253
Charge totale.	136795

L'espace parcouru ayant été de 56717 mètres en une heure, et les rampes $0^m,003$ sur une partie du parcours, la dépense d'eau a été de 4643 litres, $1^l,289$ par seconde.

2e *Expérience.*

Poids à remorquer.	66935 kilog.
Charge totale.	101 tonnes.

A la vitesse de 58 kil. à l'heure, la dépense d'eau a été de 5460 litres, $1^l,516$ par seconde.

Au retour, avec la même charge, la pente étant favorable au mouvement, la vitesse fut de 64 kilomètres, et la quantité d'eau consommée en 36 minutes fut de 2943 litres, $1^l,36$ par seconde.

3e *Expérience.*

La charge totale est réduite à 72 tonnes.

La vitesse obtenue a été de 69 kilom. à l'heure, et la quantité d'eau dépensée pendant le même temps fut de 5380 litres, $1^l,494$ par seconde.

Dimension de la machine qui a servi à faire ces expériences.

	m.
Diamètre des cylindres.	0,38
Course des pistons.	0,56
Diamètre des roues motrices	1,676
Surface de chauffe par la boîte à feu.	4,62
Surface de chauffe par les tubes.	68,56

Sur le chemin de Liverpool à Manchester, où les machines ont des dimensions moindres, la consommation d'eau est en moyenne de 2830 litres par heure, $0^{l},786$ par seconde, à des vitesses de 61 à 63 kilomètres.

Proportions des machines à voyageurs sur ce chemin.

	m.
Diamètre des cylindres	0,305
Course des pistons	0,457
Diamètre des roues motrices	1,523
Surface de chauffe par la boîte à feu	4.46
Surface de chauffe par les tubes	42 55

Les dimensions des machines à marchandises ne diffèrent de ces dernières qu'en ce que le diamètre des cylindres est de $0^{m},33$, et la course des pistons $0^{m},508$. Ces machines à marchandises sont toutes à cylyndres intérieurs, et les deux paires des roues de devant sont couplées.

Le chemin de Liverpool à Manchester est de niveau sur presque toute sa longueur; la plus forte pente est de $1^{m},5$ pour une longueur de 6400 mètres. La charge des trains de voyageurs est de 35 tonnes, et celle des trains de marchandises de 100 tonnes; mais on fait souvent usage de deux machines pour remorquer des trains de marchandises de 200 et jusqu'à 240 tonnes. La consommation de combustible sur ce chemin n'est que de $4^{k},6$ à $5^{k},06$ par kilomètre pour les trains de voyageurs, et de $6^{k},95$ pour les trains de marchandises; dans l'un et l'autre cas, la consommation est beaucoup plus élevée sur les autres lignes. La consommation de coke est habituellement aujourd'hui de 7 à 9 kilog.

Des expériences faites par M. Stephenson ont paru démontrer que pour faire mouvoir une machine et son tender à la vitesse ordinaire de 48 à 50 kilomètres, il faut autant de coke que pour faire mouvoir une charge de 15 voitures, c'est-à-dire que la consommation pour la machine et le tender, sans charge additionnelle, est la moitié de celle qui a lieu lorsque 15 voitures sont ajoutées à la machine (445).

L'alimentation du foyer doit être aussi régulière que possible, et faite de manière que le coke soit en complète incandescence quand la dépense de vapeur doit être augmentée, ou encore quand le niveau de l'eau est élevé dans la chaudière et que l'on peut supprimer l'action des pompes, que la vapeur s'échappe légèrement par les soupapes et que la machine voyage à une bonne vitesse.

L'intervalle de deux chargements successifs de coke est variable. Dans les pentes considérables et pour de fortes charges, on peut alimenter tous les 3 à 4 kilomètres; dans les cas contraires, on peut parcourir 24 à 25 kilomètres.

Le coke est mis au feu par le chauffeur à l'ordre du mécanicien, qui tient la chaîne de la porte du foyer pour refermer cette porte pendant

que le chauffeur charge sa pelle. Celle-ci doit être bien remplie et le coke distribué également sur le foyer.

463. Le tableau suivant donne les *pertes de pression, en centimètres de hauteur d'eau, produites dans le foyer et dans la boîte à fumée,* pour des machines du chemin de fer du Nord, fonctionnant dans les conditions ordinaires du service.

VITESSE en kilomet.	NOMBRE de voitures.	OUVERTURE DU TUYAU D'ÉCHAPPEMENT en centimètres carrés						OBSERVATIONS.
		110 à 90		90 à 70		70 à 50		
		Boîte à fumée.	Foyer.	Boîte à fumée.	Foyer.	Boîte à fumée.	Foyer.	
55	(a) 11 (b) 12	(a) 8.05	(a) 5.05	(a) 8.72	(a) 6.36	(b) 14.90	(b) 9.75	Machine à voyageurs, système Stephenson.
55	(c) 10 (d) 16	(c) 11.14	(c) 6.24	(c) 16.00	(c) 10.33	(d) 18.25	(d) 11.80	Machine à voyageurs, système Clapeyron.
22	33	9.62	6.70	10.10	6.9	12.40	8.54	Machine à marchandises.
		210 à 240		140 à 100				
		Boîte à fumée.	Foyer.	Boîte à fumée.	Foyer.			
60	12	6.25	4.18	6.57	4.35			Machine Crampton.

464. *Dispositions relatives à l'emploi des machines à vapeur locomobiles et locomotives.* (Extrait des ordonnances des 22 et 23 mai 1843.) (304).

1° *Machines locomobiles.* Sont considérées comme locomobiles les machines à vapeur qui, pouvant être transportées facilement d'un lieu dans un autre, n'exigent aucune construction pour fonctionner à chaque station.

Les chaudières et autres pièces de ces machines sont soumises aux épreuves et aux conditions de sûreté prescrites pour les machines fixes (n°s 304, 305, 306, 308, 309 et 310), sauf les exceptions suivantes, pour celles de ces chaudières qui sont construites suivant un système tubulaire :

1° Lesdites chaudières peuvent être éprouvées sous la pression double seulement de la pression effective;

2° On peut, quelle que soit la tension de la vapeur dans ces chaudières, remplacer le manomètre à air libre par un manomètre à air comprimé, ou même par un thermomanomètre, c'est-à-dire par un thermomètre gradué en atmosphères et parties décimales d'atmosphère : les indicateurs de ces instruments devront être parfaitement lisibles et en vue du chauffeur ;

3° On peut se dispenser d'adapter auxdites chaudières un flotteur d'alarme, et il suffira qu'elles soient munies d'un tube indicateur en verre convenablement placé.

Indépendamment des timbres relatifs aux conditions de sûreté (305), toute locomobile reçoit une plaque portant le nom du propriétaire.

Aucune locomobile ne peut fonctionner à moins de 100 mètres de distance de tout bâtiment sans une autorisation spéciale donnée par le maire de la commune. En cas de refus, la partie intéressée peut se pourvoir devant le préfet.

Si l'emploi d'une machine locomobile présente des dangers, soit parce qu'il n'aurait point été satisfait aux conditions de sûreté prescrites ci-dessus, soit parce que la machine n'aurait pas été entretenue en bon état de service, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, peut suspendre ou même interdire l'usage de cette machine.

2° *Machines locomotives.* Les machines à vapeur locomotives sont celles qui, en se déplaçant par leur propre force, servent au transport des voyageurs, des marchandises ou des matériaux.

Comme pour les machines locomobiles, les dispositions pour les machines fixes des n°s 304, 305, 306, 308, 309 et 310 sont applicables aux chaudières et autres pièces de ces machines, sauf l'exception suivante :

Les soupapes de sûreté des machines locomotives peuvent être chargées au moyen de ressorts disposés de manière à faire connaître, en kilogrammes et en fractions décimales de kilogramme, la pression qu'ils exercent sur les soupapes.

Aucune machine locomotive ne peut être mise en service sans un permis de circulation délivré par le préfet du département où se trouve le point de départ de la locomotive.

La demande du permis contient les indications comprises sous les 1° et 3° de la demande en autorisation des machines fixes (n° 307, p. 386), et fait connaître de plus le nom donné à la machine locomotive et le service auquel elle est destinée.

Le nom de la locomotive est gravé sur une plaque fixée à la chaudière.

Le préfet, après avoir pris l'avis de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, délivre, s'il y a lieu, le permis de circulation.

Dans ce permis sont énoncés :

1° Le nom de la locomotive et le service auquel elle est destinée ;



2° La pression maximum (en nombre d'atmosphères) de la vapeur dans la chaudière, et les numéros des timbres dont la chaudière et les cylindres auront été frappés;
3° Le diamètre des soupapes de sûreté;
4° La capacité de la chaudière;
5° Le diamètre des cylindres et la course des pistons;
6° Enfin, le nom du fabricant et l'année de la construction.

Si une machine locomotive ne satisfait pas aux conditions de sûreté ci-dessus prescrites, ou si elle n'est pas entretenue en bon état de service, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, peut en suspendre ou même en interdire l'usage.

Les conditions auxquelles est assujettie la circulation des locomotives et des convois, en tout ce qui peut concerner la sûreté publique, sont déterminées par arrêtés du préfet du département où est situé le lieu du départ, après avoir entendu les entrepreneurs, et en ayant égard tant au cahier des charges des entreprises qu'aux dispositions des règlements d'administration publique concernant les chemins de fer.

FRAIS DE CONSTRUCTION ET D'EXPLOITATION DES CHEMINS DE FER.

465. *Considérations pécuniaires sur l'établissement d'un chemin de fer*. Lors de l'établissement d'un chemin de fer, on doit considérer :

1° Les frais de construction, représentés dans les frais d'exploitation par l'intérêt du capital;
2° Les frais d'entretien du chemin;
3° Les frais de traction;
4° Les frais généraux.

466. *La dépense d'exécution d'un chemin de fer se divise comme il suit :*

1° Études;
2° Acquisition des propriétés, indemnités pour dommages et dépréciations;
3° Terrassements;
4° Percements de souterrains;
5° Ouvrages d'art (ponts, viaducs, aqueducs, murs de soutènement, murs de clôture, etc.);
6° Établissement de la voie (rails, coussinets, traverses, sable, croisement de voies, plaques tournantes, etc.);
7° Clôtures et barrières;
8° Bâtiments pour les stations (stations principales, stations intermédiaires, remises pour locomotives et pour diligences, magasins, réservoirs);
9° Atelier de réparation avec outillage;
10° Matériel pour l'exécution du chemin (wagons de terrassement, tombereaux, outils, hangars provisoires, etc.);

11° Matériel d'exploitation du chemin (locomotives, voitures de différentes espèces pour le transport des voyageurs, chariots pour le transport des marchandises et pour celui des animaux);
12° Approvisionnements en matières premières, telles que combustibles, métaux pour la réparation des locomotives et diligences;
13° Frais d'administration (directeur, ingénieurs, conducteurs de travaux, gardes, caissier, dessinateurs, expéditionnaires, etc.);
14° Frais de contentieux (notaires, avocats, avoués, etc.);
15° Faux frais divers (publications, journaux);
16° Intérêt de l'argent pendant la durée de la construction;
17° Frais imprévus pour accidents, articles oubliés, etc.

467. *Devis pour la voie et le matériel d'un chemin de fer.* (Les nombres suivants sont en partie extraits du *Portefeuille des chemins de fer*, de MM. Perdonnet et Polonceau).

M. Vuigner, ingénieur de la compagnie du chemin de fer de Paris à Strasbourg, établit le prix de revient du mètre courant de cette voie de la manière suivante :

Ballast ou fondation de la voie, 2m,20 de sable, gravier ou cailloux, à 3 fr. 60 c. le mètre cube.	8,00
0mc,10 de bois pour traverses, à 75 fr. le stère.	7,50
75 kilog. de fer pour rails, à 360 fr. la tonne rendue sur la ligne.	27,00
20 kilog. de fonte pour coussinets, à 260 fr. la tonne rendue sur la ligne.	5,20
1,05 kilog. de chevillettes, à 48 centimes.	0,50
1,8 coins, à 17 fr. 50 c. le cent.	0,32
Déplacement de matériaux dans les chantiers de réception, etc.	1,00
Déplacement des chantiers à pied d'œuvre et pose.	2,00
Frais généraux pour prime dans les usines.	0,98
Total pour une simple voie.	52,50
Et pour une double voie.	105,00

Il faut compter en outre pour voies accessoires dans les stations :

Les gares d'évitement, etc., 1/20 en sus.	5 fr. 25 c.	11,00
Changements et croisements de voies.	2 75	
Plates-formes tournantes	3 00	
Total.		116,00

M. Vuigner a pris, pour composer le prix de revient du mètre courant de voie, les prix élémentaires payés à la fin de l'année 1846 par la compagnie du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

Il a admis le chiffre de 1/20 pour la longueur de voies d'évitement, garage, remisage, etc., et les chiffres de 2 fr. 75 c. et 3 fr. pour l'établissement des plaques tournantes et des changements de voies.

Sur les chemins de fer aux environs de Paris, les voies accessoires pour les gares d'évitement, l'exploitation des stations, le service des ateliers, etc., ont dépassé le dixième du développement des voies principales. Sur les chemins d'Orléans et de Rouen elles n'ont été que les 3/40.

On a pensé que 1/20 suffirait pour le chemin de Paris à Strasbourg

parce qu'à mesure que l'on s'éloigne de Paris, les stations non-seulement diminuent d'importance, mais encore sont plus espacées.

On peut diminuer la dépense des voies de remisage en employant pour ces voies, dans les remises de wagons, des rails de 15 à 20 kilog. au lieu de ceux de 37 kilog. dont on se sert pour les voies principales.

Les dépenses pour changements et croisements de voies, etc., et celles pour plates-formes tournantes, varient aussi en raison du nombre et de l'importance des stations.

Au chemin de fer d'Orléans, les changements et croisements de voies, etc., ont entraîné dans une dépense qui s'élève, pour chaque mètre courant de simple voie, à 2 fr. 70 c., et les plates-formes, à 3 fr. 43 c.

Si l'on a compté pour un chemin tel que celui de Paris à Strasbourg 2 fr. 75 c. pour les changements de voies et 3 fr. pour les plaques tournantes, bien que les stations y soient moins nombreuses et moins importantes que sur celui d'Orléans, cela tient à ce que les rails du chemin de Strasbourg sont d'environ 1/4 plus lourds que ceux du chemin d'Orléans, et les plaques tournantes sont de plus grande dimension.

Passant au *matériel d'exploitation*, M. Vuigner en établit le devis pour le chemin de Paris à Strasbourg comme il suit, en remarquant que le matériel comprend, savoir :

1° Les locomotives avec leurs tenders;
2° Les voitures, wagons et trucks;
3° Les grues hydrauliques et accessoires pour l'alimentation des machines;
4° L'outillage des ateliers de réparation;
5° Enfin, le mobilier des stations.

1° Les locomotives et les tenders forment un des articles les plus importants du matériel d'exploitation d'un chemin de fer.

TABLEAU du nombre et du parcours annuel des locomotives de quelques chemins de fer.

DÉSIGNATION des chemins.	ANNÉES.	NOMBRE des locomotives.	PARCOURS MOYEN ANNUEL des machines		
			à voyageurs.	à marchand.	Ensemble.
			kilom.	kilom.	kilom.
Nord.	1849	196	19600	13500	17300
Chemins belges.	1848	160	»	»	22400
Saint-Germain et Versailles (R. d.).	1849	32	13878	»	13878
Paris à Orléans.	1849	75	14952	20570	16900
Rouen et Havre.	1849	78	20524	24316	21885
Orléans à Bordeaux. . .	1849-50	31	»	»	21817
Strasbourg à Bâle. . . .	1849	29	»	»	16093

Aujourd'hui on ne craint pas, dans quelques cas, de faire parcourir aux locomotives 150 à 200 et même 250 kilom., sans autres temps de repos que les arrêts aux stations; il y a à peine quelques années que cette limite semblait devoir être fixée à 120 kilom.

Sur la ligne d'Orléans, le *nombre moyen de voyageurs par train*, rapporté à la distance entière, était de 100 pour les années 1844 et 1845.

Sur le chemin de Strasbourg à Bâle, le nombre moyen de voyageurs par convoi, rapporté à la distance entière, a été de 51 pendant les mêmes années.

Comme il y avait sur ce dernier chemin des convois mixtes dans lesquels le nombre des voitures à voyageurs était réduit à 7,19, et que dans les convois spéciaux de voyageurs ce nombre de voitures était de 10,35, tandis que sur le chemin d'Orléans il était généralement de 10,55, le chiffre de la moyenne ci-dessus doit être porté à 60 voyageurs pour être dans les conditions proportionnelles à celles du chemin d'Orléans.

Le chemin de Paris à Strasbourg a été considéré comme présentant des conditions d'exploitation semblables, d'une part, à celles du chemin d'Orléans pour une certaine zone aux environs de Paris, et d'autre part, au chemin de Bâle pour une autre zone aux environs de Strasbourg.

Quant aux marchandises, le nombre moyen de tonnes, par train spécial, rapporté à la distance entière, a été, pour le chemin de fer d'Orléans, en 1844, de 60 tonneaux, et de 67 en 1845.

Au chemin de Rouen, la moyenne était de 100 tonneaux environ pour les trains allant à Paris; mais comme au retour la moyenne n'était au maximum que de 20 tonneaux, la moyenne générale n'était en réalité que de 60 tonneaux.

On a admis pour le chemin de Strasbourg et ses embranchements une moyenne de 60 tonneaux.

La charge moyenne en voyageurs ou en marchandises étant également connue, on en déduit le nombre de convois nécessaire pour assurer le service, puis le parcours kilométrique des convois et celui des machines, et en divisant ce parcours kilométrique annuel de toutes les machines par celui d'une seule, on a le nombre des machines.

Ainsi, sur le chemin de Strasbourg et ses embranchements, on a compté sur un parcours annuel total de 1970 339 kilom. pour les voyageurs, et sur celui de 18000 kilom. par machine, ce qui a conduit au nombre de 110 locomotives.

2° *Voitures.* Sur le chemin d'Orléans il y avait une voiture pour 3270 kilomètres parcourus pour le service des voyageurs; sur le chemin de Rouen, ce chiffre était 2931; cela donne une moyenne de 3100.

L'application de cette moyenne au parcours (1970339 kilom.) des voyageurs, sur le chemin de Strasbourg et ses embranchements, con-

duit au chiffre de 630 pour le nombre total des voitures nécessaires.

Quant aux wagons et trucks pour le service des marchandises et le transport des chaises de poste, bestiaux, etc., leur nombre peut se déduire par approximation du nombre de locomotives. Sur les chemins d'Orléans et de Rouen, il y avait environ dix wagons pour une locomotive. On a adopté la même proportion pour le chemin de Strasbourg.

Le prix moyen des voitures de voyageurs étant de 7500 fr., et celui des wagons, trucks, etc., de 4000 fr., la dépense du matériel des voitures revient, pour le chemin de Paris à Strasbourg, approximativement à 15 fr. par mètre courant de chemin de fer.

3°, 4° et 5°. La dépense relative aux grues hydrauliques et accessoires pour l'alimentation des machines, à l'outillage des ateliers de réparation et au mobilier des stations, toujours calculée sur les données fournies par les chemins en exploitation, s'élèverait à 5 fr. par mètre courant.

C'est largement compter que d'admettre 3 fr. pour le mètre courant de clôture.

Tels sont les éléments qui peuvent servir à établir le devis de la voie et du matériel d'un chemin de fer. Quoique recueillis avec soin, MM. Perdonnet et Polonceau conseillent néanmoins, pour éviter toute erreur, d'ajouter encore à l'ensemble du devis ainsi calculé un vingtième de somme à valoir.

468. ***TABLEAU** des prix d'exécution des différents chemins de fer, canaux et routes, par lieue de 4 kilomètres.*

CHEMINS FRANÇAIS.

	fr.
Petits chemins établis autour des mines ou dans les mines, à Saint-Étienne, Épinac, etc. (poids de 1 mètre de longueur de rail, 7 à 8 kil.)	20000 à 40000
Chemin de Montron à Montbrison, établi à une voie sur l'accotement de la route impériale, desservi par des chevaux	60000
Chemin de Denain, établi pour le service des mines à la surface, à une voie, desservi par des chevaux	88000
Chemin à une voie, d'Épinac au canal du Centre, desservi par des chevaux et des machines fixes	228000
Chemin à une voie, de Saint-Étienne à Andresieux, desservi par des chevaux	400000
Chemin de Roanne à Saint-Étienne, à une seule voie, desservi par locomotives, chevaux et machines fixes, environ	460000
Chemin de Bâle à Strasbourg	1000000
Id. de Rouen	1400000
Id. d'Orléans	1500000
Id. de Saint-Germain	2500000
Id. de Versailles (rive droite)	3500000
Id. de Versailles (rive gauche)	4000000

CHEMINS ANGLAIS.

	fr.
Chemins établis aux environs de Newcastle, pour le transport du charbon, à une voie.	140 000
Chemin de Preston à Loogridge, à uue voie.	240 000
Id. do Darlington, à nne voie, pour le transport du charbon, desservi par locomotives à la vitesse de 4 lieues à l'heure.	328 000
Chemin de Cromford à Peakforest, desservi par chevaux et machines fixes, à une voie.	336 000
Chemin de Newcastle à Carlisle, à une voie, traversant l'Angleterre de l'Est à l'Ouest, desservi par locomotives à grande vitesse.	480 000
Chemin de Leeds à Selby, à deux voies, desservi par locomotives à grande vitesse.	1 000 000
Chemin de Birmingham à Liverpool, pour le transport des voyageurs, à grande vitesse.	1 500 000
Chemin de Liverpool à Manchester.	2 600 000
Id. de Londres à Birmingham.	3 300 000
Id. *id.* à Greenwich, établi sur arcades et en grande partie dans l'intérieur de Londres.	5 300 000
Chemin de Blackwall, établi entièrement dans l'intérieur de la ville, desservi par des machines fixes.	12 000 000
Chemins belges, prix moyen.	500 000
Id. des États-Unis, prix moyen.	250 000

CANAUX.

Les canaux anglais, pour la plupart à petite section, et ne pouvant porter que des bateaux dont la charge dépasse rarement 60 tonneaux, ont coûté moyennement.	580 000
Les canaux français, généralement à grande section, capables de porter des bateaux chargeant de 100 à 150 tonneaux, ont coûté moyennement.	500 000
Canal de Briare, à petite section.	466 000
Id. du Centre, à moyenne section (les bateaux chargent de 60 à 80 tonneaux).	480 000
Canal du Languedoc, à grande section.	550 000
Id. de Saint-Quentin, à grande section.	540 000

ROUTES.

Routes impériales non pavées.	150 000
Id. pavées.	250 000

469. *Différents modes de traiter d'une compagnie avec les entrepreneurs.*

1° *Mode à forfait.* Un entrepreneur s'engage à construire toute la voie, ou simplement une partie, cas qui oblige de traiter avec plusieurs entrepreneurs, pour une somme déterminée. Les inconvénients de ce mode de traiter sont que les entrepreneurs font fortune ou faillite, et qu'on ne peut pas modifier les plans pendant l'exécution.

2° *Mode par série de prix.* Un ou plusieurs grands entrepreneurs, ou un grand nombre de petits entrepreneurs, s'engagent à construire la voie à raison de tant par mètre de chaque espèce d'ouvrage. C'est le meilleur mode de traiter, aussi l'em-

ploie-t-on généralement en France. Il vaut mieux traiter avec les grands entrepreneurs qu'avec les tâcherons.

3° *Mode en régie.* La compagnie fait exécuter elle-même ses travaux, et elle paye ses employés et ses ouvriers; c'est le mode le plus dispendieux, mais il permet d'accélérer, autant qu'il est possible, l'exécution des travaux. Il y a du reste des travaux dont on ne peut évaluer d'avance la valeur, et que l'on est obligé de faire exécuter de cette manière.

4° *Mode en régie intéressée.* La compagnie laisse aux directeurs de chantiers une partie de l'économie faite sur l'exécution des travaux, au-dessous des prix portés aux devis; c'est le mode qui offre le moins de garantie d'une bonne exécution des travaux.

470. *TABLEAU des frais d'entretien annuel, par kilomètre, des chemins de fer, canaux et routes.*

		fr.
Chemins anglais desservis par des chevaux (transit de 100000 tonneaux)		560
Pour les chemins français desservis par des chevaux (transit de 100000 tonneaux)		340
Chemin de fer de Saint-Germain (vitesse moyenne, 8 à 9 lieues à l'heure; circulation annuelle 1500000 voyageurs, représentant 500000 tonnes, poids brut)	1ᵉʳ mois	4250
	mois suivants	4000
Canal du Centre (mal entretenu)		900
Id. de Briare		1600
Id. de Languedoc		2100
Canal de grande jonction		4000
Id. de Kennet et Avon		2600
Id. de Leeds à Liverpool		2300
Routes françaises départementales		200 à 250
Id. *id.* impériales		500
Id. anglaises, 875 à 1000 et même		1125

TABLEAU des dépenses d'entretien, par kilomètre de longueur, de la voie de fer, des ouvrages et des bâtiments des stations en 1850 (*Chemins de fer d'Angleterre*, par M. Le Chatelier).

CHEMINS.	LONGUEUR entretenue.	ENTRETIEN.	RENOUVELLEMENT de la voie.	TOTAL.
	kilom.	fr.	fr.	fr.
Londres, Brighton et South-Coast	144.2	2295.96	533.78	2829.74
Lancashire et Yorkshire	327.4	3024.50	453.10	3477.70
East-Lancashire	127.1	1890.90	49.60	1940.50
South-Eastern	394.2	1677.60	467.90	2145.50
Midland (*a*)	799.7	1878.40	413.10	2291.50
Eastern-Counties	518.1	1871.10	834.40	2705.50
Londres et North-Western (*b*)	769.1	3017.20	696.60	3713.80

(*a*) L'entretien du télégraphe électrique a coûté en outre 11 fr. par kilomètre.
(*b*) *Id.* 35 fr. 50 *id.*

471. *Prix du transport d'une tonne à 1 kilomètre, sur chemins de fer et canaux.*

Chemins de Roanne et de Saint-Étienne, vitesse 16 kil. environ (combustible, chauffeurs, service des pompes, graissage, réparation des machines et wagons)		fr. 0,0423
Canal	de Mons à Condé (retour avec moitié charge)	0,015
Id.	de Saint-Quentin (retour à vide)	0,020
Id.	de Givors (retour avec charge complète)	0,016
Id.	*id.* (retour à moitié charge)	0,024
Id.	de Languedoc	0,017
Id.	du Centre	0,028
Id.	de Briare	0,030

Quoique les frais de bateaux soient compris dans ces résultats, en séparant les frais de wagons, qui s'élèvent à $0^f,0120$, de ceux de traction sur les chemins de fer, la dépense est encore un peu moins forte pour les canaux que pour les chemins de fer.

Les frais de traction par kilomètre parcouru par une locomotive, d'après le relevé fait en 1849 sur plusieurs chemins français, peuvent se diviser ainsi qu'il suit (*Guide du mécanicien*).

	fr.		fr.
Frais de régie	0,05	à	0,06
Personnel des dépôts	0,06	à	0,07
Mécaniciens et chauffeurs	0,18	à	0,20
Combustible	0,40	à	0,50
Graissage et nettoyage	0,02	à	0,025
Eau	0,02	à	0,02
Dépenses diverses	0,02	à	0,025
Entretien des machines et tenders	0,35	à	0,40
Total	1,10	à	1,30

Ce qui fait une moyenne de $1^f,20$. Le parcours des locomotives étant de 1/10 plus élevé que celui des convois, cela porte le prix par kilomètre parcouru par le convoi à $1^f,32$.

CINQUIÈME PARTIE.

Architecture.

ORDRES D'ARCHITECTURE.

472. *Module*. Pour comparer entre elles les dimensions des différentes parties d'un même ordre d'architecture, on prend pour unité le demi-diamètre de la colonne, que l'on appelle *module*. Le module se divise en vingt-quatre parties pour le dorique grec, le toscan et le dorique romain, et en trente-six parties pour les trois ordres élevés.

473. *Observations relatives aux tableaux suivants*. Nous avons réuni, planche première, les cinq ordres de Vignole, et nous y avons joint le dorique imité des Grecs. Ce dernier est plus généralement employé sans piédestal; le fût de la colonne repose directement sur des marches remplaçant la plinthe qui sert de base à la colonne quand il y a un piédestal.

Dans les tableaux suivants, qui renferment les proportions des différentes moulures et membres de moulures qui composent chaque ordre, on va toujours de la partie supérieure de l'ordre à la partie inférieure.

Le nu du mur qui surmonte l'ordre, celui de l'architrave, du gorgerin et du fût à sa partie supérieure, se trouvant sur le même aplomb, c'est-à-dire faisant une égale saillie sur l'axe de la colonne, dans les tableaux suivants, les saillies de l'entablement et du chapiteau sont comptées à partir de ces nus, dont la saillie sur l'axe pour les ordres :

Dorique grec, Toscan, Dorique romain, Ionique, Corinthien, Composite, est respectivement :

18,2 part.	19 part.	20 part.	30 part.	30 part.	30 part.

Pour la base de la colonne, les saillies sont comptées à partir du nu de la partie inférieure du fût. La saillie de ce nu, sur l'axe de la colonne, est de un module dans tous les ordres.

Les saillies du piédestal sont comptées à partir du nu du dé. Ce nu se trouve à l'aplomb de la plinthe et du tore inférieur de la base de la colonne; sa saillie sur l'axe de la colonne est respectivement, pour les ordres précédents :

1 m. 3,73 p.	1 m. 9 p.	1 m. 10 p.	1 m. 14 p.	1 m. 14 p.	1 m. 14 p.

***TABLEAU** des proportions des différentes moulures et membres de moulures qui composent les différents ordres.*

DORIQUE IMITÉ DES GRECS, 10 M.

	Membres de moulures qui composent l'ordre.	Hauteur.	Saillie.
	Entablement, 4 m. 8 p.	Mod. Part.	Mod. Part.
Corniche, 1 m. 2 p.	Réglet	2.6	1 4.6
	Quart de rond	5.2	1 4.6
	Listel	1.3	1
	Petit quart de rond	1.3	1
	Filet	0.65	22.75
	Larmier	9.75	22.10
	Listel	1.3	18.85
	Mutules	2.6	18.2
	Gouttes	1.3	18.2
Frise, 1 m. 15 p.	Petite baguette	0.65	2.6
	Hauteur du bandeau, 3.25.		0.65
	Chapeaux des triglyphes	4.55	1.95
	Triglyphes	1 9.8	1.63
	Face de la frise		0 0
Archit., 1 m. 15 p.	Listel	2.6	1.95
	Haut. des chap des gouttes, 2.6.		1.63
	Hauteur des gouttes, 1.3.		1.63
	Face de l'architrave	1 12.4	
	Colonne, 11 m. 8 p.		
Chapiteau, 18.85 p.	Tailloir	9.1	9.1
	Quart de rond. — A la plus grande saillie	.7.8	9.1
	Quart de rond. — Au bas		2.6
	Annelets. — Filet super.	.1.95	2.6
	Annelets. — Filet infér.		0.65
	Ce sont quatre petits filets séparés entre eux par un refouillement égal à leur hauteur.		
Fût, 10 m. 5.15 p.	Partie comprise entre les annelets et la rainure	5.2	0 0
	Rainure	0.65	
	Fût	9 23.3	0 0
Base, 8 p.	Plinthe, ou marche continue sous le fût	8	3.73
	Piédestal, 3 m. 8 p.		
Corn., 10.4 p.	Réglet	1.7	6.06
	Larmier	5.2	5 2
	Talon. — Plus gr. saillie	.3.5	2.6
	Talon. — Au bas		0.65
Dé, 2 m. 9.9 p.	Dé	2 6.4	0 0
	Congé	3.5	3.5
Base, 11.7 p.	Premier socle	3.9	3.5
	Deuxième socle	7.6	4.33

TOSCAN, 22 M. ½ P.

	Membres de moulures qui composent l'ordre.	Hauteur.	Saillie.
	Entablement, 3 m. 12 p.	Mod. Part.	Mod. Part.
Corniche, 1 m. 8 p.	Cimaise supérieure. — Quart de rond	8	1 12
	Cimaise supérieure. — Baguette	2	1 5
	Cimaise supérieure. — Filet	1	1 4
	Larmier. — Congé	2	1 2
	Larmier. — Larmier	10	1 2
	Larmier. — Profond. de la mouchette, 1 p.		
	Larmier. — Filet	1	9
	Cimaise infer. — Talon — En haut	.8.	8
	Cimaise infer. — Talon — En bas		1
Frise, 1 m. 4 p.		1 4	0 0
Arch., 1 m.	Filet. — Listel	4	4
	Plate-bande. — Congé	4	4
	Plate-bande. — Face	16	0 0
	Colonne, 14 m.		
Chapiteau, 1 m.	Tailloir. — Filet	2	10
	Tailloir. — Congé	2	8
	Tailloir. — Larmier	4	6
	Cimaise. — Quart de rond	6	7.5
	Cimaise. — Filet	2	2
	Gorgerin. — Congé	2	2
	Gorgerin. — Part. cylindr.	6	0 0
Fût, 12 m.	Astragale. — Baguette	2	3
	Astragale. — Filet	1	2
	Fût. — Congé supér.	2	2
	Fût. — Fût	11 16	0 0
	Fût. — Congé infér.	3	3
Base, 1 m.	Filet	2	3
	Tore	10	9
	Plinthe	12	9
	Piédestal, 4 m. 18 p.		
Corn., 12 p.	Cimaise. — Listel	4	8
	Cimaise. — Talon — En haut	.8.	7
	Cimaise. — Talon — En bas		1
Dé, 3 m. 16 p.	Socle	3 12	0 0
	Congé	4	4
Base, 12 p.	Filet	2	4
	Socle	10	8

Le revers d'eau qui empêche l'eau de séjourner sur la corniche de l'entablement a 4 parties de hauteur.

DORIQUE ROMAIN, 25 M. 8 P.

	MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre.	HAUTEUR.	SAILLIE.
	ENTABLEMENT, 4 m.	Mod. Part.	Mod. Part.
Corniche, 1 m. 12 p.	Filet de couronnement. . .	2	2
	Doucine.	6	1 18
	Filet.	1	1 18
	Talon. . . { En haut.	. . .2. .	1 17.5
	{ En bas.		1 16.5
	Larmier.	7	1 16
	Talon. . . { En haut.	. . .2. .	1 15
	{ En bas.		13.5
	Mutules.	6	1 13
	Largeur du filet horizontal extérieur du canal, 1 p.		
	Profondeur du canal au-dessus du filet extérieur, 1 p.		
	Largeur de filet horizontal intérieur du canal, 1 p.		
	Gouttes des mutules. { Saillie de leur emplacem. { à l'ext	. . .1. .	1 8
	{ à l'int.		8
	Les gouttes ont 2 p 2/3 de grand diametre; elles sont en nombre de 36 sous chaque mutule ; elles sont disposées symétriquement par rang de 6, de manière à occuper un carré.		
	Quart de rond.	4	7
	Filet.	1	3
	Chapeaux des triglyphes. .	4	2
Frise, 1 m. 12 p.	Triglyphes.	1 12	1
	Metopes.	1 12	0
Archit., 1 m.	Listel.	4	4
	Chapiteau des gouttes. . .	1	3
	Gouttes.	3	3
	Première plate-bande. . .	12	1
	Deuxième plate-bande. . .	8	0
	COLONNE, 16 m.		
Chapiteau, 1 m.	Listel.	1	10
	Talon. . . { En haut.	. . .2. .	9.5
	{ En bas.		8
	Tailloir.	5	7.5
	Quart de rond.	5	7
	Baguette.	2	3
	Filet.	1	2
	Gorgerin. { Congé.	2	2
	{ Part. cylindriq.	6	0
Fût, 14 m.	Astragale { Baguette.	2	3
	{ Filet.	1	2
	Fût. . . . { Congé supér. . .	2	2
	{ Fût.	13 15.5	0
	{ Congéinférieur.	3.5	3.5
Base, 1 m.	Filet.	1.33	3.5
	Baguette.	2.67	5
	Tore.	8	10
	Socle ou plinthe.	12	10
	PIÉDESTAL, 5 m. 8 p.		
Corniche, 12 p.	Listel.	1	12
	Quart de rond.	2	11.5
	Filet.	1	9 5
	Larmier. . { Congé.	1.5	
	{ Partie droite. .	3.5	8
	Talon. . . { En haut.	. . .3. .	3
	{ En bas.		0.5
Dé, 4 m.	Socle.	3 21	0
	Congé.	3	3
Base, 20 p.	Filet.	1	3
	Baguette.	2	4
	Talon renversé	4	7
	Deuxième socle.	5	8
	Premier socle.	8	10

IONIQUE, 28 M. 18 P.

	MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre.	HAUTEUR.	SAILLIE.
	ENTABLEMENT, 4 m. 18 p.	Mod. Part.	Mod. Part.
Corniche, 1 m. 27 p.	Filet de couronnement. . .	3	1 26
	Doucine ou cimaise supér.	10	1 26
	Filet.	1	1 16
	Talon. . . { En haut. . . .	. . .4. .	1 15
	{ En bas.		1 12
	Larmier.	12	1 11
	Refouillement du larmier, 1 p		
	Larg. du filet horizontal extér. qui borde la mouchette, 4 p.		
	Larg du filet horizontal intér. qui borde la mouchette, 2 p.		
	Quart de rond.	8	27
	Baguette.	2	20
	Filet.	1	19
	Cordon des denticules. . .	3	13
	Denticules.	12	18
	Filet.	2	10
	Talon ou cim. inf. { En haut. . . .	. . .8. .	8.5
	{ En bas.		1.5
Frise, 1 m. 18 p.		1 18	0 0
Architrave, 1 m. 9 p.	Listel.	3	10
	Talon. . . { En haut. . . .	. . 6. .	9.33
	{ En bas.		4 67
	Première face.	15	4
	Deuxième face.	12	2
	Troisième face.	9	0
	COLONNE, 18 m.		
Chapiteau, 24 p.	Filet.	2	10
	Talon. . . { En haut. . . .	. . .4. .	9
	{ En bas.		6
	Listel.	2	5
	Canal des volutes.	6	4
	Quart de rond. . { En haut. . . .	. .10. .	14
	{ En bas.		4
Fût, 16 m. 9 p.	Astragale. { Baguette. . . .	4	6
	{ Filet.	2	4
	Fût. . . . { Congé supér. .	4	4
	{ Fût.	15 31	0 0
	{ Congé infér. .	4	4
Base, 1 m. 3 p.	Filet.	3	4
	Tore.	10	9
	Filet.	0.5	5
	Scotie.	4	4
	Filet.	0.5	8
	Deux baguettes.	4	9
	Filet.	0.5	8
	Scotie.	4	6
	Filet.	0.5	12
	Socle.	12	14
	PIÉDESTAL, 6 m.		
Corniche, 20 p.	Filet.	1	20
	Talon. . . { En haut. . . .	. . .3. .	19.5
	{ En bas.		17.5
	Larmier.	6	17
	Profond. du refouillement, 1 p.		
	Quart de rond.	6	9
	Baguette.	2	4
	Filet.	2	2.5
Dé, 4 m. 32 p.	Congé supérieur.	2.5	
	Socle.	4 25.5	0 0
	Congé inférieur.	4	4
Base, 20 p.	Filet	2	4
	Baguette.	2.67	6
	Talon renversé.	6	14
	Filet.	1.33	14
	Socle.	8	16

CORINTHIEN, 31 M. 24 P.

	Membres de moulures qui composent l'ordre.		Hauteur.	Saillie.
	Entablement, 5 m.		Mod. Part.	Mod. Part.
Corniche, 2 m.	Filet de couronnement		2	2 4
	Doucine		10	2 4
	Filet		1	1 30
	Talon	En haut	3	1 29
		En bas		1 27
	Larmier		10	1 26
	Talon	En haut	3	1 23
		En bas		1 23
	Modillon		12	1 22
	Filet		1	27
	Quart de rond		8	26
	Baguette		2	20
	Filet		1	19
	Denticules		12	18
	Filet		1	10
	Talon	En haut	6	9.33
		En bas		4
Frise, 1 m. 18 p.	Baguette		2	3.5
	Filet		1	2.5
	Congé		2.5	2.5
	Partie plane		1 12.5	0 0
Architrave, 1 m. 18 p.	Filet		2	10
	Talon	En haut	8	9.5
		En bas		4.5
	Baguette		2	4
	Première face		14	3
	Talon	En haut	4	2.67
		En bas		1.3
	Deuxième face		12	1
	Baguette		2	1
	Troisième face		10	0
	Colonne, 20 m.			
Chapiteau, 2 m. 12 p.	Quart de rond		4	
	Filet		2	
	Face du tailloir		6	
	Haut de la lèvre du vase, 4 p.			13
	Grandes volutes		16	34
	Haut. des petites volutes, 12 p.			18
	Petites feuilles supérieures		8	28
	Haut. du rev. de ces feuilles, 4 p.			
	Grandes feuilles		24	16
	Haut. de leur revers, 8 p.			
	Feuilles inférieures		24	13
	Revers de ces feuilles, 8 p.			

	Membres de moulures qui composent l'ordre.		Hauteur.	Saillie.
	Suite de la **colonne.**		Mod. Part.	Mod. Part.
Fût, 16 m. 24 p.	Astragale	Baguette	4	6
		Filet	2	3
	Fût	Congé supér.	3	3
		Fût	16 16	0 0
		Congé infér.	3	3
		Filet	2	8
Base, 1 m.	Tore		6	7
	Filet		0.5	4
	Scotie		2.5	3
	Filet		0.5	6 25
	Deux baguettes		3	7
	Filet		0.5	6 25
	Scotie		2.5	5
	Filet		0.5	9
	Tore		8	14
	Socle		12	14
	Piédestal, 6 m. 24 p.			
Corniche, 28 p.	Filet		1.33	16
	Talon	En haut	2.67	15.5
		En bas		13.5
	Larmier		6	13
	Gorge ou gouttière		2.5	6
	Baguette		2	3
	Filet		1.5	2
	Frise		10	0
	Baguette		2	4
Dé, 5 m. 8 p.	Filet		2	3
	Congé		3	3
	Socle		4 34	0 0
	Congé		3	3
	Filet		2	3
Base, 24 p.	Baguette		2	4
	Talon renversé		6	12
	Filet		2	12
	Tore		6	16
	Socle		8	16

COMPOSITE, 31 M. 24 P.

	MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre.	HAUTEUR.	SAILLIE.
	ENTABLEMENT, 5 m.	Mod. Part.	Mod. Part.
Corniche, 2 m.	Filet de couronnement	3	2
	Doucine	18	2
	Filet	2	1 26
	Talon. En haut.	4	1 25
	Talon. Au bas.		1 22
	Baguette	2	1 21.5
	Larmier	10	1 20
	Doucine, moitié fait partie de la mouchette : pour la moitié en-dessous du larmier	3	1 6
	Filet	2	1
	Talon. En haut.	8	35
	Talon. Au bas.		29
	Haut. du filet des denticules, 1 p.		22
	Denticules	16	28
	Filet	2	16
	Quart de rond	10	14
Frise, 1 m. 18 p.	Baguette	2	4
	Filet	1	2.5
	Congé supérieur	2.5	2.5
	Partie plane	34.5	0 0
	Congé inférieur	14	14
Architrave, 1 m. 18 p.	Filet	2	14
	Cavet	4	11.67
	Quart de rond	6	11
	Baguette	2	5
	Première face	20	4
	Talon. En haut.	4	3.33
	Talon. Au bas.		0.67
	Deuxième face	16	0 0
	COLONNE, 20 m.		
Chapiteau, 2 m. 12 p.	Quart de rond	3	
	Filet	1	
	Haut. de la face du tailloir, 8 p.		
	Distance vert. de la face du tailloir au quart de rond circulaire, 4 p.		
	Haut. du quart de rond, 8 p.		12
	Haut. de la baguette, 3 p.		5
	Haut. du filet, 1 p.		4
	Volutes	32	32
	Grandes feuilles	24	16
	Haut. du rev. de ces feuilles, 8 p.		
	Petites feuilles	24	13
	Haut. du rev. de ces feuilles, 6 p.		

	MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre.	HAUTEUR.	SAILLIE.
	Suite de la COLONNE.	Mod. Part.	Mod. Part.
Fût, 16 m. 24 p.	Astragale. Baguette	4	6
	Astragale. Filet	2	4
	Fût. Congé supér.	4	4
	Fût. Fût	16 7	0 0
	Fût. Congé infér.	4	4
	Fût. Filet	3	4
Base, 1 m.	Tore	6	8
	Filet	0.5	5
	Scotie	3	4
	Filet	0.5	6.67
	Baguette	1	7.5
	Filet	0.5	6.67
	Scotie	4	5.33
	Filet	0.5	10
	Tore	8	14
	Socle	12	14
	PIÉDESTAL, 6 m. 24 p.		
Corniche, 28 p.	Filet	1.33	16
	Talon. En haut.	3	15.5
	Talon. Au bas.		13.5
	Larmier	6	13
	Doucine	2.67	7
	Filet	1	2.5
	Cavet	2	0.5
	Frise	10	0 0
	Baguette	2	4
Dé, 5 m. 8 p.	Filet	2	2.5
	Congé supérieur	2.5	2.5
	Socle	4 33.5	0 0
	Congé inférieur	4	4
	Filet	2	4
Base, 24 p.	Baguette	2	5.5
	Talon renversé. En haut.	6	6
	Talon renversé. Au bas.		10.5
	Filet	2	12.5
	Tore	6	16
	Socle	8	16

NOTA. *Membre* est le nom général qu'on donne à toute partie d'architecture, comme une frise, une corniche, etc. Une moulure prend aussi le nom de *membre*, et une moulure accompagnée d'un filet au-dessus ou au-dessous prend le nom de *membre couronné*.

***TABLEAU** comparatif des proportions des parties principales des ordres d'architecture.*

DÉSIGNATION DES PARTIES.			DORIQUE grec.	TOSCAN.	DORIQUE romain.	IONIQUE.	CORINTHIEN.	COMPOSITE.
			Mod. Part.	Mod. Part.	Mod. Part.	Mod Part.	Mod. Part.	Mod. Part.
Entablement..	Corniche...	Hauteur......	1 2	1 8	1 12	1 27	2	2
		Saillie.......	1 4.6	1 12	2	1 26	2 4	2
	Frise.....	Hauteur......	1 15	1 4	1 12	1 18	1 18	1 18
	Architrave..	Hauteur......	1 15	1	1	1 9	1 18	1 18
		Saillie.......	1.95	4	4	10	10	14
Colonne..	Chapiteao..	Hauteur......	18.85	1	1	24	2 12	2 12
		Saillie.......	9.1	10	10	10	13n	12r
	Fût......	Hauteur......	10 5.15	12	14	16 9	16 24	16 24
		Diamètre en haut (a)........	1 12.4	1 14	1 16	1 24	1 24	1 24
		Nombre des cannelures.....	20b	0	20b	24m	24m	24m
	Base.....	Hauteur......	8	1	1	1 3	1	1
		Saillie.......	3.73	9	10	14	14	14
Piédestal..	Corniche...	Hauteur......	10.4	12	12	20	28	28
		Saillie.......	6.06	8	12	20	16	16
	Dé......	Hauteur......	2 9.9	3 16	4	4 32	5 8	5 8
		Saillie sur le fût.	3.73	9	10	14	14	14
	Base.....	Hauteur......	11.7	12	20	20	24	24
		Saillie.......	4.33	8	10	16	16	16
Hauteur totale.......		de l'entablement.	4 8	3 12	4	4 16	5	5
		de la colonne...	11 8	14	16	18	20	20
		du piédestal...	3 8	4 16	5 8	6	6 21	6 24
		de l'ordre.....	19	22 4	25 8	28 18	31 24	31 24
Entre-colonnement, mesuré d'axe en axe des colonnes			»	6 16	7 12	6 18	6 24	6 24
Portique sans piédestal.	Distance d'axe en axe des colonnes...............		»	9 12	10	11 18	12	12
	Ouverture de l'arcade entre les piedroits		»	6 12	7	8 18	9	9
	Distance verticale de la clef de l'arcade au-dessous de l'architrave................		»	1	2	1	2	2
Portique avec piédestal.	Distance d'axe en axe des colonnes..............		»	12 18	15	15	16	16
	Ouverture de l'arcade entre les piedroits		»	8 18	10	11	12	12
	Distance verticale de la clef au-dessous de l'architrave....		»	1 4	1 8	2	1 24	1 24

(*a*) Le diamètre ne commence à décroître qu'à partir du tiers de la hauteur du fût; dans le dorique grec, il décroît depuis le bas.

b Cannelures à arêtes vives; on ne fait qu'arrondir légèrement l'arête de séparation. La largeur des cannelures est égale à leur rayon.

m Cannelures creusées en demi-cercle et séparées par un listel du tiers de leur largeur.

n Cette saillie est celle de la lèvre du vase; cette lèvre est circulaire; au lieu que les parties qui la surmontent ont la forme indiquée planche première.

r Cette saillie est celle du quart de rond; consulter le tableau page 543 et la planche première.

NOTA. Les colonnes des portiques doivent être engagées du 1/4 de leur diamètre dans les piedroits, c'est-à-dire qu'elles doivent saillir des 3/4 de leur diamètre.

Dans une colonnade, la distance des colonnes au mur de l'édifice est au moins égale à la distance des colonnes; elle est quelquefois double de cette distance, et même triple pour l'ordre corinthien.

Quelquefois les colonnes vont en s'amincissant depuis le bas jusqu'en haut; mais ordinairement on ne fait décroître leur diamètre qu'à partir du 1/3 de la hauteur du fût, et, afin qu'elles ne paraissent pas renfler en ce point, on ne les fait décroître que d'une manière progressive. Généralement la diminution du diamètre du fût est de 1/5 de son diamètre à sa base pour l'ordre Toscan, 1/6 pour le Dorique romain, 1/7 pour l'ordre Ionique, et 1/8 pour le Corinthien et le Composite.

474. *Corniches des maisons d'habitation.* On proportionne leurs dimensions à l'importance de l'édifice, et lorsqu'on veut s'astreindre à leur donner les dimensions d'un ordre d'architecture, on détermine ces proportions en considérant la hauteur totale du mur (corniche comprise), comme étant celle de l'ordre complet adopté pour la corniche. Ainsi la corniche devant être de l'ordre romain et le mur ayant 12 mètres de hauteur, comme le dorique a 25 modules 8 parties ou 25,33 modules de hauteur totale, et sa corniche 1 module 12 parties ou 1,5 module (473), on a

$$25,33:1,5::12:x, \quad \text{d'où} \quad x=0^{m},71.$$

x hauteur de la corniche à construire.

ÉPAISSEURS DES MURS.

475. *Formules empiriques données par Rondelet pour déterminer les épaisseurs des murs.* (Traité sur l'art de bâtir).

1° *Murs d'enceintes non couvertes.* D'après les observations de Rondelet sur des édifices de tous genres, il résulte qu'un mur jouira d'une forte stabilité s'il a pour épaisseur le 1/8 de sa hauteur, que le 1/10 lui procurera une stabilité moyenne, et le 1/12 le moindre degré de stabilité qu'il puisse avoir. Cependant, comme dans les édifices les murs se consolident mutuellement, il en résulte qu'avec une moindre épaisseur ils peuvent avoir quelquefois une stabilité suffisante.

Un mur tout à fait isolé résiste moins qu'un mur entretenu par un autre à une de ses extrémités, et celui-ci, moins qu'un mur soutenu par un autre à chacune de ses extrémités. De plus, un mur soutenu par un autre à ses deux extrémités exige une épaisseur d'autant plus grande qu'il a plus de longueur, et quand il est très-long, son épaisseur doit être la même que s'il était isolé.

Supposons que l'on a un espace rectangulaire non couvert à entourer de murs, soient AB et AB', figure 1re, planche II, les dimensions de ce

rectangle, c'est-à-dire les longueurs des murs. Pour avoir leurs épaisseurs, au point A on élève une perpendiculaire AC égale à leur hauteur; du point C comme centre, avec un rayon égal au 1/8, au 1/10 ou au 1/12 de AC, suivant que la stabilité doit être grande, moyenne ou faible, on décrit un arc de cercle *mn;* on mène la droite CB, qui rencontre l'arc *mn* au point *o;* du point *o* on abaisse la perpendiculaire *or* sur AC, et *or* est l'épaisseur du mur dont la longueur est AB.

Pour avoir l'épaisseur du mur dont la longueur est AB', il suffit de mener CB', et du point *p*, où cette droite rencontre l'arc *mn*, d'abaisser la perpendiculaire *ps*, qui est l'épaisseur du mur dont la longueur est AB'.

Si l'espace à entourer n'était pas un rectangle, mais un polygone quelconque, on déterminerait l'épaisseur de chaque mur en opérant comme on vient de le faire pour les murs AB et AB'.

Si tous les murs n'avaient pas la même hauteur, on opérerait encore de la même manière, mais en prenant la perpendiculaire AC égale à la hauteur de chacun d'eux.

Le triangle rectangle ABC donne $BC = \sqrt{AB^2+AC^2}$ (*Int.*, 586). Les deux triangles semblables ABC et C*or* donnent (*Int.*, 550) $or : Co :: AB : CB :: AB : \sqrt{AB^2+AC^2}$; d'où on tire, en faisant $Co = \frac{AC}{8}$,

$$or = \frac{AC}{8} \times \frac{AB}{\sqrt{AB^2+AC^2}} \quad \text{ou} \quad e = \frac{h}{8} \times \frac{l}{\sqrt{l^2+h^2}}.$$

$or = e$ épaisseur du mur en mètres;
$AC = h$ hauteur du mur en mètres;
$AB = l$ longueur du mur en mètres;
$\frac{1}{8}$ coefficient qui varie suivant l'exposition du mur au vent et la nature des matériaux, et que Rondelet fait encore varier de 1/8 à 1/12 pour les mêmes matériaux, suivant qu'il veut donner au mur une plus ou moins grande stabilité.

La construction graphique et la formule précédente font voir que l'épaisseur d'un mur est d'autant plus forte que la hauteur et la longueur sont plus grandes.

2° *Murs isolés.* Si l est très-grand par rapport à h, ce qui peut arriver pour un mur de clôture par exemple, la formule précédente donne sensiblement

$$e = \frac{h}{8}.$$

La construction graphique donne le même résultat; car si la longueur AB est très-grande par rapport à AC, CB est sensiblement parallèle à AB, et la perpendiculaire *or* diffère peu du 1/8 de AC, valeur que

l'on adopterait pour un mur isolé, c'est-à-dire pour un mur qui ne serait entretenu par aucun autre.

Pour qu'un mur isolé résiste à la poussée du vent, il suffit que le moment de son poids, par rapport à son arête extérieure de contact avec la surface du sol, autour de laquelle le vent tend à le faire tourner, soit au moins égal au moment de la poussée du vent, pris également par rapport à cette arête; ainsi, pour l'équilibre statique, il suffit que l'on ait, par mètre de longueur de mur,

$$eh\delta \times \frac{e}{2} = ph \times \frac{h}{2}, \quad \text{d'où on tire} \quad e = \sqrt{\frac{ph}{\delta}}.$$

p pression du vent contre le mur, en kilogrammes par mètre carré de surface; elle est variable suivant les lieux; sur les bords de la mer, un vent qui vient du large peut donner $p=278$ kilog. (205);

ph pression du vent contre un mètre de longueur de mur; comme elle agit avec un bras de levier $\frac{h}{2}$ pour renverser le mur, son moment est $ph \times \frac{h}{2}$ (*Int.*, 1041);

δ poids d'un mètre cube de maçonnerie (45);

eh volume d'un mètre de longueur de mur; $eh\delta$ est son poids, et comme ce poids, qui est appliqué au centre de gravité du mur, a pour bras de levier $\frac{e}{2}$, il en résulte que son moment est $eh\delta \times \frac{e}{2}$.

Faisant dans cette formule $p = 278^k$, $h = 2^m{,}60$ et $\delta = 2200^k$, on en conclut, pour ce cas extrême, $e = 0^m{,}573$. La formule empirique précédente de Rondelet, en y faisant $h = 2^m{,}60$, et en supposant l très-grand, comme pour un mur de clôture, par exemple, donne seulement $e = 0^m{,}325$.

3° *Murs circulaires.* De tels murs pouvant être considérés comme formés d'une infinité d'autres d'une longueur infiniment petite et s'appuyant mutuellement par leurs extrémités, il en résulte qu'ils devraient subsister avec une épaisseur aussi faible que possible; c'est en effet ce que confirme l'expérience suivante : si on prend une grande feuille de papier, il sera impossible de la faire tenir debout en ligne droite, au lieu que si on la tourne en cylindre, elle se tiendra avec une certaine stabilité, quoique son épaisseur ne soit pas un millième de sa hauteur.

Cependant, comme ces murs doivent avoir une certaine épaisseur pour être solides, il conviendra, pour déterminer l'épaisseur d'un mur circulaire, de considérer l'enceinte comme un polygone régulier de douze côtés, ou, pour plus de facilité, de chercher simplement l'épaisseur d'un mur droit d'une longueur égale à la moitié du rayon de enceinte, et soutenu à ses deux extrémités. La formule du 1° devient alors

$$e=\frac{h}{8}\times\frac{\frac{r}{2}}{\sqrt{\frac{r^2}{4}+h^2}}.$$

r rayon de l'enceinte.

4° *Murs des bâtiments couverts d'un simple toit.* Lorsque la charpente qui forme le toit d'un édifice est bien entendue, loin de nuire à la solidité des murs ou points d'appui qui la soutiennent, elle sert à les entretenir. Rondelet, pour établir une règle sûre et facile pour déterminer l'épaisseur à donner aux murs des édifices qui ne sont pas voûtés, a considéré que les entraits des fermes de charpente qui forment les combles étant toujours disposés dans le sens de la largeur L des bâtiments, ainsi que les poutres et les solives des planchers, ils doivent servir à entretenir les murs qui les supportent; mais qu'à cause de l'élasticité et de la flexibilité dont les bois sont susceptibles, ils ne laissent pas de fatiguer les murs en raison de la plus grande largeur des espaces qu'ils renferment, et que par conséquent c'est la largeur et la hauteur des pièces qui doivent servir à déterminer l'épaisseur des murs. Ainsi, pour déterminer l'épaisseur des murs d'un édifice couvert d'un simple toit, quand rien ne s'appuie contre les faces de ces murs jusque sous les entraits de la ferme du comble, on prendra AB (figure 1, planche II) égal, non à la longueur du mur, mais à la largeur du bâtiment, et on décrira l'arc *mn* avec le 1/12 de la hauteur du mur pour rayon, au lieu du 1/8; ce qui donnera alors la formule

$$e=\frac{h}{12}\times\frac{L}{\sqrt{L^2+h^2}}.$$

L largeur du bâtiment.

Si les murs qui supportent le toit étaient appuyés à une certaine hauteur par d'autres constructions ou par des toits inférieurs s'appuyant contre leurs faces extérieures, comme des appentis, ce qui a lieu dans les églises en basilique, l'arc *mn* serait décrit avec un rayon égal à la 24e partie de la somme obtenue en ajoutant à la hauteur totale h du mur la hauteur h' dont ce mur surmonte l'appui extérieur; on ferait $AC = h+h'$, h' étant la distance verticale du faîte de l'appentis à la naissance du toit qui recouvre l'édifice. La formule précédente devient alors

$$e=\frac{h+h'}{24}\times\frac{L}{\sqrt{L^2+(h+h')^2}}.$$

5° *Murs de maisons d'habitation.* Rondelet observe que dans les maisons ordinaires, où la hauteur des planchers ne dépasse pas 3m,90 à 4m,87, pour déterminer l'épaisseur des murs de refend, il ne faut

avoir égard qu'à la longueur de l'espace qu'ils divisent et au nombre de planchers qu'ils ont à soutenir; mais que quant aux murs de face, qui sont isolés d'un côté dans toute leur hauteur, il faut avoir égard à la largeur du bâtiment et à son élévation.

Pour un *corps de logis simple*, figure 3, planche II, dont les mêmes pièces tiennent toute la largeur ou profondeur L du bâtiment, pour déterminer l'épaisseur des murs de face, on ajoute la largeur $ab = L$ à la moitié de la hauteur du bâtiment sous la naissance du toit, et le 1/24 de cette somme est l'épaisseur à donner à chacun des murs de face, au-dessus du socle ou première retraite du rez-de-chaussée. Cette règle revient à la formule

$$e = \frac{L + \frac{h}{2}}{24}.$$

Pour une construction moyenne, on augmente e de $0^m,027$, et de $0^m,054$ pour une construction solide.

Pour un *corps de logis double*, fig. 11, pl. II, c'est-à-dire pour un corps de logis divisé en deux par un mur ab parallèle aux murs de face, on obtient l'épaisseur à donner aux murs de face en ajoutant la largeur $cd = L$ à la hauteur du bâtiment et en prenant le 1/48 de cette somme; ce qui revient à la formule

$$e = \frac{L + h}{48}.$$

Pour déterminer l'épaisseur à donner à un *mur de refend ef*, fig. 11, planche II, on ajoute à la longueur $dg = L'$ de l'espace que ce mur doit diviser la hauteur H de l'étage, et on prend le 1/36 de cette somme; ce qui revient à la formule

$$e = \frac{L' + H}{36}.$$

On peut ajouter 1/2 pouce ($0^m,0135$) pour chaque étage au-dessus du rez-de-chaussée; ainsi, pour trois étages, on ajouterait $0^m,0405$ à la valeur de e pour avoir l'épaisseur du mur par le bas. Cette proportion est celle qui convient pour les constructions en briques ou en pierres d'une dureté moyenne. Si l'on est obligé d'employer des pierres tendres ou les tufs en usage dans quelques départements, au lieu de 1/2 pouce, on ajoute 1 pouce par étage à la valeur de e.

Pour déterminer l'épaisseur du mur ab qui divise l'espace compris entre les murs de face, même figure, on opère de la même manière que pour le mur ef. Ainsi, en supposant que hi ne soit qu'une légère séparation augmentant peu la solidité, on ajoute la longueur cd de l'espace divisé par ce mur à la hauteur de l'étage, et on prend le 1/36 de la sommo; le résultat trouvé est l'épaisseur qu'il faut donner au mur

s'il ne s'élève que d'un étage. Pour une plus grande hauteur, on ajoute encore 1/2 pouce par étage au-dessus du rez-de-chaussée.

Pans de bois et cloisons. Lorsqu'à un mur on substitue un pan de bois en charpente, hourdé en plâtre et ravalé des deux côtés pour ne former qu'une seule pièce, il suffit de lui donner la moitié de l'épaisseur que devrait avoir, d'après la règle, le mur qu'il remplace. Pour une cloison légère qui ne porte pas de plancher, 1/4 de l'épaisseur du mur suffit.

Appuis isolés. L'épaisseur des appuis isolés maintenus d'aplomb par les parties environnantes varie du 1/8 au 1/12 de leur hauteur.

476. *Épaisseurs ordinaires des murs.* Les observations qui ont permis à Rondelet d'établir les formules du numéro précédent lui ont fait reconnaître que, pour les maisons d'habitation divisées en plusieurs étages par des planchers et entrecoupées par des murs de refend ou des pans de bois, les murs de face avaient une épaisseur de $0^m,41$ à $0^m,65$, les murs mitoyens de $0^m,435$ à $0^m,54$, et les murs de refend de $0^m,325$ à $0^m,487$.

Les murs mitoyens renfermant ordinairement les cheminées des deux maisons voisines, leur moindre épaisseur $0^m,435$ est plus forte que la plus faible $0^m,41$ des murs de face.

En général, les données précédentes de Rondelet ne diffèrent pas sensiblement des épaisseurs en usage aujourd'hui dans la pratique, épaisseurs que contient le tableau suivant.

TABLEAU des épaisseurs en usage pour les murs de maisons d'habitation de largeur moyenne et d'une hauteur de 3 à 4 étages.

DÉSIGNATION DES PARTIES DES MURS.		MURS de face.	MURS de refend.	HAUTEUR d'étage.
Aux fondations.		0m.75 à 1m.00	0m.70 à 0m.85	
Au niveau du sol. .	des caves.	0 .55 0 .80	0 .50 0 .05	
	du rez-de-chaussée. .	0 .50 0 .65	0 .35 0 .40	
Au-dessus du plancher	du 1er étage.	0 .45 0 .55	•	3m.25 à 5m.00
	du 2e étage.	0 .40 0 .50	0 .30 0 .35	3 .00 4 .25
	du 3e étage.	0 .32 0 .40	0 .25 0 .30	2 .80 3 .50

	ÉPAISSEURS AU REZ-DE-CHAUSSÉE. MURS de face.	MURS mitoyens.	MURS de refend.
Bâtiments plus considérables que les maisons d'habitation. . . .	0m.65 à 1m.00	0m.55 à 0m.65	0m.40 à 0m.55
Palais ou édifices avec voûtes au rez-de-chaussée.	1 .20 2 .50	1 .00 1 .50	0 .70 1 .20

477. *Espace occupé par les murs.* Rondelet a aussi déterminé le rapport de l'espace occupé par les murs et points d'appui, déduction faite de l'espace occupé par les portes et les fenêtres, à l'espace total occupé par les édifices; il a trouvé :

1° Pour les palais de Rome dont les pièces du rez-de-chaussée sont voûtées. . . . . $\frac{2}{9}=0,222$

2° Pour les bâtiments avec planchers, du siècle de Louis XIV. . . . $\frac{1}{6}=0,166$

3° Pour les bâtiments du siècle de Louis XV et ceux faits depuis. . $\frac{1}{8}=0,125$

4° Pour les bâtiments actuels en briques. . . . . $\frac{2}{17}=0,117$

En ne déduisant pas les vides des portes et croisées, ce rapport est 1/4 pour les palais de Rome; 1/4 pour ceux avec planchers construits sur la fin du règne de Louis XIV ou au commencement de celui de Louis XV, et 2/15 dans les bâtiments en briques.

Dans plusieurs bâtiments de Paris bâtis depuis le règne de Louis XV, les murs et points d'appuis sont le 1/5, en ne déduisant pas les vides, et les 2/15 en les déduisant ; c'est à peu près les proportions que donne la règle des moindres épaisseurs

proposée par Rondelet, c'est-à-dire les 3/16 sans déduction des vides et les 2/16 avec déduction.

Dans les palais de Paris et des environs, tels que le Louvre, les Tuileries, le Luxembourg, Versailles, les murs et points d'appui occupent les 7/18, et les 5/18 en déduisant les vides des portes, croisées, arcades et autres.

A Paris, dans les bâtiments actuels, le rapport de la superficie occupée par les murs, déduction des vides, à celle des appartements qu'ils embrassent est environ 1/8.

DIMENSIONS DES DIFFÉRENTES PARTIES D'UN ÉDIFICE.

478. *Largeur de la façade d'un édifice.* L'axe de la façade d'un édifice quelconque doit passer par le milieu d'une ouverture, et les deux moitiés de la façade doivent être symétriques par rapport à cet axe.

Pour un pavillon isolé, la longueur de la façade est ordinairement égale à la hauteur.

Pour un édifice ordinaire, la longueur de la façade varie de une fois 1/2 à trois fois la hauteur. Lorsque la destination du bâtiment exige une plus grande longueur, on varie la façade en élevant des arrières ou avant-corps, ou simplement en la divisant par des chaînes saillantes; mais, malgré ces précautions, dans aucun cas la longueur ne doit dépasser dix fois la hauteur, limite qu'il ne convient d'atteindre que pour les casernes, les magasins, les ateliers et autres bâtiments de ce genre.

479. *Ordonnance du 1er novembre 1844, concernant la hauteur des bâtiments et de leurs combles dans Paris.* (L'ordonnance du 15 juillet 1848 n'est plus en vigueur).

TITRE I. — *De la hauteur des façades bordant la voie publique.*

Art. 1er. La hauteur des façades bordant les voies publiques est déterminée par la largeur de ces voies publiques.

Le maximum de cette hauteur, y compris les corniches ou entablements, ainsi que les attiques construits à plomb desdites façades, est de 11m,70 pour les voies publiques de moins de 7m,47; 14m,62 par les voies publiques de 7m,47 et au-dessus, jusque et y compris 9m,42; et 17m,55 pour les voies publiques au-dessus de 9m,42

Art. 2. Pour les bâtiments neufs et pour les anciens bâtiments reconstruits de fond en comble, c'est la largeur future de la voie publique qui règle la hauteur des façades.

Pour les reconstructions partielles et pour les exhaussements, c'est la largeur présente de la voie publique qui règle la hauteur des façades, dans le cas même où ces façades ne doivent pas subir de retranchement.

Art. 3. Tout bâtiment formant encoignure, et donnant par conséquent sur deux, trois ou quatre voies publiques, peut, par exception, lorsque ces voies publiques sont d'inégales largeurs, être élevé sur les plus étroites à la hauteur fixée pour la plus large.

Cette exception n'a lieu que dans l'épaisseur du bâtiment, et ne peut, dans aucun cas, excéder une longueur de 15 mètres de face à partir des encoignures.

Art. 4. Dans les bâtiments situés entre deux voies publiques d'inégales largeurs,

la façade bordant la voie publique la moins large peut aussi, par exception, être à la hauteur fixée pour la plus large; mais dans le cas seulement où la plus grande distance entre les deux façades du bâtiment n'excède pas 15 mètres.

Art. 5. Lorsqu'on fait des constructions qui couvrent toute la superficie d'un terrain situé entre deux voies publiques d'inégales largeurs, et distantes l'une de l'autre de plus de 15 mètres, le corps de bâtiment bordant la voie publique la plus large peut également, par exception, être élevé à la hauteur permise pour cette dernière voie publique du côté le moins large, mais dans le cas seulement où la plus grande épaisseur du bâtiment n'excède pas 15 mètres.

Pour les constructions occupant le surplus de l'épaisseur 15 mètres, et bordant par conséquent la voie publique la moins large, la hauteur des façades ne peut excéder celle fixée en raison de la largeur de cette voie publique.

Art. 6. La largeur des voies publiques est prise au-devant des façades, et lorsque les voies publiques n'ont pas leurs côtés parallèles, c'est la moindre largeur qui règle la hauteur des façades.

Si le débouché d'une autre voie publique est vis-à-vis desdites façades, la largeur se prend à partir d'une ligne fictive allant de l'une à l'autre encoignure de ce débouché.

Il en est de même pour les bâtiments situés dans les carrefours formés par le débouché de plusieurs voies publiques (on prend pour largeur la plus petite de celles que peuvent déterminer les droites fictives joignant chaque encoignure à toutes les autres).

Art. 7. La hauteur des façades des bâtiments donnant sur une seule voie publique est mesurée à partir soit du pavé, soit du dallage du trottoir (la hauteur, au pied des façades, s'établit ainsi qu'il suit : 0m,17 au-dessus du fond du ruisseau, plus 0m.04 par mètre de pente), en se plaçant, lorsque la voie publique est en pente, sur le point le plus bas, afin que, conformément à l'art. 1er, les façades ne puissent excéder dans aucune de leurs parties la hauteur légale.

Par la même raison, lorsque les bâtiments donnent sur plusieurs voies publiques de niveaux différents, la hauteur est mesurée sur la façade bordant la voie publique la moins élevée, et aussi en se plaçant sur le point le plus bas lorsque cette voie publique est inclinée.

TITRE II. — *Des combles.*

Art. 8. Dans les bâtiments simples ou doubles ayant deux murs de face, et dont les combles sont par conséquent à deux versants, lorsque l'épaisseur de ces bâtiments a moins de 9m,74, la hauteur des combles ne peut excéder la moitié de l'épaisseur desdits bâtiments, et lorsque cette épaisseur est de 9m,74 et au-dessus, le maximum de hauteur est de 4m,87.

Art. 9. Dans les bâtiments n'ayant qu'un mur de face, tels que sont les bâtiments adossés contre des murs mitoyens, et dont par conséquent les combles sont à un seul versant, lorsque ces bâtiments ont moins de 4m.87 d'épaisseur, la hauteur des combles ne peut pas excéder l'épaisseur desdits bâtiments, et lorsque cette épaisseur est de 4m,87 et au-dessus, ces 4m,87 sont le maximum de hauteur des combles.

Art. 10. Pour les bâtiments ayant deux murs de face, l'épaisseur est celle comprise entre les parements extérieurs desdits murs.

Art. 11. Pour les bâtiments n'ayant qu'un seul mur de face, l'épaisseur est celle comprise entre le parement extérieur dudit mur et le parement intérieur du mur mitoyen contre lequel le bâtiment est adossé.

Art. 12. Lorsque les deux murs de face ne sont pas parallèles, c'est l'épaisseur moyenne des bâtiments qui règle la hauteur des combles.

Art. 13. A l'égard du profil de ces combles, la ligne déterminant leur versant du côté de la voie publique est droite; elle peut partir de la saillie de la corniche, et

l'angle que cette ligne forme avec celle horizontale représentant la base du comble est au plus de 45°.

Il résulte de cette disposition que dans les bâtiments de 9m,74 d'épaisseur et au-dessus, la ligne déterminant le versant du comble ne pouvant correspondre avec la verticale passant par le milieu du bâtiment qu'en excédant la hauteur fixée, le comble est tronqué dans sa partie supérieure, de manière à former une terrasse dont le point culminant ne doit pas excéder la hauteur fixée pour le comble.

Art. 14. La hauteur des combles est mesurée à partir d'une ligne horizontale passant par un point dont la position est déterminée par la hauteur légale du mur de face sur la voie publique.

Art. 15. Les égouts construits à la naissance du versant des combles ne sont tolérés, quant à présent, que lorsque leur saillie n'excède pas 0m,10 sur celles des corniches.

Art. 16. Le relief des chenaux ne peut excéder la ligne droite, réelle ou fictive, partant de la saillie de la corniche et formant avec l'horizontale déterminant la base du comble un angle de 45°.

Art. 17. La face extérieure des lucarnes doit être placée en arrière du parement extérieur du mur de face donnant sur la voie publique, et à une distance d'au moins 0m,30.

Leur hauteur, y compris toiture, ne peut excéder 3m,00 dans les combles ayant de 4m,50 à 4m,87 d'élévation à partir de la ligne de base de ces combles.

Dans les combles moins élevés, la hauteur des lucarnes ne peut excéder les 2/3 de leur élévation (l'administration permet aujourd'hui de l'augmenter jusqu'à la hauteur du faîtage).

La largeur hors œuvre des lucarnes ne peut excéder 1m,50; leurs jouées doivent être parallèles. L'intervalle desdites lucarnes, lors même qu'on leur donne moins de 1m.50 de largeur, doit être au moins de 1m,50.

Enfin, la saillie de leurs corniches, égouts compris, ne doit pas excéder 0m,15.

Art. 18. Les tuyaux de cheminées et les murs contre lesquels ils sont adossés ne peuvent percer la ligne rampante du comble, qu'à une distance de 1m,50 prise horizontalement à partir d'une verticale passant sur le parement extérieur du mur de face bordant la voie publique, et ces constructions ne peuvent, dans aucun cas, excéder de plus d'un mètre la hauteur des combles.

480. En vertu d'une loi du 13 avril 1850, une commission est instituée à Paris pour rechercher les logements insalubres, indiquer les travaux à faire pour les rendre salubres, et, si le propriétaire se refuse à les faire, le condamner à une amende de 100 fr. pour la première fois, et du montant, et même du double des travaux à faire pour la seconde.

481. *Décret du 26 mars 1852 concernant les conditions de construction dans Paris.*

Art. 1er. Les rues de Paris continueront d'être soumises au régime de la grande voirie.

Art. 2. Dans tout projet d'expropriation pour l'élargissement, le redressement ou la formation des rues de Paris, l'administration aura le droit de comprendre la totalité des immeubles atteints lorsqu'elle jugera que les parties restantes ne sont pas d'une étendue ou d'une forme qui permette d'y élever des constructions salubres.

Elle pourra pareillement comprendre dans l'expropriation des immeubles en dehors des alignements, lorsque leur acquisition sera nécessaire pour la suppression d'anciennes voies jugées inutiles.

Les parcelles de terrains acquises en dehors des alignements, et non susceptibles de recevoir des constructions salubres, seront réunies aux propriétés contiguës, soit

à l'amiable, soit par l'expropriation de ces propriétés conformément à l'art. 53 de la loi du 16 septembre 1807.

La fixation du prix de ces terrains sera faite suivant les mêmes formes et devant la même juridiction que celle des expropriations ordinaires.

L'art. 58 de la loi du 3 mai 1841 est applicable à tous les actes et contrats relatifs aux terrains acquis pour la voie publique par simple mesure de voirie.

Art. 3. A l'avenir l'étude de tout plan d'alignement de rue devra nécessairement comprendre le nivellement; celui-ci sera soumis à toutes les formalités qui régissent l'alignement

Tout constructeur de maison, avant de se mettre à l'œuvre, devra demander l'alignement et le nivellement de la voie publique au devant de son terrain, et s'y conformer.

Art. 4. Il devra pareillement adresser à l'administration un plan et des coupes cotés des constructions qu'il projette, et se soumettre aux prescriptions qui lui seront faites dans l'intérêt de la sûreté publique et de la salubrité.

Vingt jours après le dépôt de ces plans et coupes au secrétariat de la préfecture de la Seine, le constructeur pourra commencer les travaux d'après son plan, s'il ne lui a été notifié aucune injonction

Une coupe géologique des fouilles pour fondation du bâtiment sera dressée par tout architecte constructeur, et remise à la préfecture de la Seine.

Art. 5. Les façades de maisons seront constamment tenues en bon état de propreté. Elles seront grattées, repeintes ou badigeonnées au moins une fois tous les dix ans, sur l'injonction qui sera faite au propriétaire par l'autorité municipale. Les contrevenants seront passibles d'une amende qui ne pourra excéder 100 fr.

Art. 6. Toute construction nouvelle dans une rue pourvue d'égout devra être disposée de manière à y conduire les eaux pluviales et ménagères.

La même disposition sera prise pour toute maison ancienne en cas de grosses réparations, et, en tout cas, avant dix ans.

Art. 7. Il sera statué par un décret ultérieur, rendu dans la forme des règlements d'administration publique, en ce qui concerne la hauteur des maisons, les combles et les lucarnes.

Art. 8. Les propriétaires riverains des voies publiques empierrées supporteront les frais de premier établissement des travaux, d'après les règles qui existent à l'égard des propriétaires riverains des rues pavées.

Art. 9. Les dispositions du présent décret pourront être appliquées à toutes les villes qui en feront la demande, par des décrets spéciaux rendus dans la forme des règlements d'administration publique.

482. *Division de la hauteur d'un bâtiment. Hauteur des étages.* Pour un bâtiment à deux étages, on divise la hauteur en seize parties égales, et on donne sept parties au rez-de-chaussée, cinq au premier étage et quatre au second.

Pour un bâtiment à un seul étage, on divise la hauteur totale en douze parties égales, sept parties pour le rez-de-chaussée et cinq pour l'étage.

Mandar donne pour les maisons d'habitation les hauteurs suivantes :

Caves.	Rez-de-chaussée.	Entre-sol.
2m,27 à 2m,92	3m,25 à 4m,22 et jusqu'à 5m,20	2m,27 à 2m,60.

1er étage.	2e étage.	3e étage.	4e étage.
3m,25 à 3m,90 et jusqu'à 5m,85	2m,92 à 3m,90	2m,60 à 2m,92	2m,27 à 2m,60

Le même auteur compte de 0m,41 à 0m,54 pour les épaisseurs des voûtes de caves, plus 0m,11 à 0m,16 de charge, et de 0m,41 à 0m,49

pour les épaisseurs des planchers, y compris carreau ou parquet et plafond.

L'administration parisienne ne tolère plus, dans les constructions nouvelles, moins de $2^m,60$ de hauteur d'étage.

483. *Arcades.* Quand on veut conserver aux murs la plus grande solidité possible, ce qui est indispensable dans les entrepôts, les magasins, etc., la hauteur de l'arcade est seulement égale à une fois la largeur entre les piliers; dans quelques édifices, elle est égale à une fois 1/2 cette largeur, et dans les portiques ordinaires elle est égale à deux fois.

Quand les arcades sont séparées entre elles par un accouplement de colonnes, l'entr'axe des colonnes accouplées est la moitié de l'entr'axe des colonnes qui limitent l'arcade, c'est-à-dire le 1/3 de la largeur totale de l'arcade; mais seulement pour les ordres inférieurs, pour les ordres élevés l'entr'axe des colonnes accouplées est le 1/4 de l'entr'axe total.

Dans les arcades sur piliers, la largeur du pilier est ordinairement égale à la moitié de l'ouverture de l'arcade, c'est-à-dire au 1/3 de l'entr'axe des piliers. On peut diminuer cette largeur : ainsi, rue de Rivoli, les piliers ont $0^m,86$ de largeur sur $0^m,65$ d'épaisseur, pour une distance de $2^m,86$ mesurée entre les piliers; ces arcades ont $5^m,83$ de hauteur, la distance des piliers aux pilastres qui leur font symétrie contre les devantures des boutiques est de $3^m,40$, les dés servant de base aux piliers ont $0^m,75$ de hauteur, et ils font saillie de $0^m,05$ tout autour de ces piliers.

484. *Frontons.* Leur montée varie du 1/5 au 1/6 de leur largeur.

485. *Portes et croisées.* Les deux dimensions des portes et croisées sont entre elles dans le même rapport que les dimensions des arcades (483); ainsi la hauteur varie de une à deux fois la largeur, et même, pour les entre-sols, la hauteur des croisées n'est quelquefois que les 2/3 de la largeur.

Une croisée carrée prend le nom de *mezzanine.*

Pour l'ordre Toscan, la hauteur des portes et croisées se fait égale à une fois 11/12 la largeur, pour le dorique deux fois, pour l'ionique deux fois 1/12 et pour le corinthien deux fois 1/6.

Dimensions des portes et croisées, et hauteur des appuis, d'après Mandar.

Portes	charretières.			$2^m.92$ à	$3^m.25$	de largeur.
	cochères.			2 .60	2 .92	*id.*
	bâtardes.			1 .30	1 .62	*id.*
	d'appartement	à 2 vantaux.	largeur. . . .	$1^m.30$	$1^m.46$	$1^m.62$
			hauteur. . . .	2 .27	2 .60	2 .92
		à 1 vantail. .	largeur. . . .	0 .73	0 .81	0 .89
			hauteur. . . .	1 .95	2 .27	2 .44

La hauteur des appartements étant successivement :

2^{m},27 2^{m},60 2^{m},92 3^{m},25 3^{m},90 et 5^{m},50 à 5^{m},85,

la hauteur des lambris d'appui est respectivement :

0^{m},76 0^{m},81 0^{m},86 0^{m},89 0^{m},97 1^{m},06

Largeur des croisées	grandes. .	1^{m}.62 à 1^{m}.79	Hauteurs des	appuis . .	0^{m}.89 à 1^{m}.06
	moyennes.	1 .46 à 1 .54		baguettes.	0 .35 à 0 .41
	petites. . .	1 .14 à 1 .30		balcons. .	0 .54 à 0 .65

Châssis à tabatière pour les combles	Hauteur. .	0^{m}.81	0^{m}.97	1^{m}.14	1^{m}.30
	Largeur. .	0 .65	0 .73	0 .81	0 .97

486. *Salles*. Pour les grandes salles de réunion, le rapport de la hauteur à la largeur est :

1° Pour les salles voûtées, la largeur étant prise dans la nef, de. . . . 1 à 1,5
2° Pour les salles rondes voûtées. 1
3° Pour les salles oblongues couvertes d'un plafond. 1
4° Pour les salles carrées couvertes d'un plafond, moins de. 1

La hauteur des salles d'habitation varie de moins de la moitié de la largeur à une fois cette largeur.

487. *Galeries*. Lorsque la longueur d'une salle dépasse deux fois la largeur, elle prend le nom de galerie, et lorsque la longueur d'une galerie est très-grande par rapport à la largeur, on la divise en travées, soit par des arcs doubleaux soutenus à l'aide de pilastres ou de colonnes, soit par tout autre moyen. Plusieurs galeries du Louvre offrent des exemples de ce genre de division.

488. *Salles à manger et tables, salles de billard, salons, chambres à coucher, etc.* La largeur d'une table à manger est ordinairement de 1^{m},50. Quelquefois on lui donne 2^{m},00; mais alors on place au milieu un surtout. Dans tous les cas, elle se termine à chaque extrémité par un demi-cercle. Pour que les domestiques circulent facilement autour de la table, la distance qui la sépare des murs de la salle doit être de 0^{m},90 à 1^{m},00 à ses extrémités, et de 1^{m},25 à 1^{m},35 latéralement.

Pour une salle de billard, il faut un espace de 2 mètres entre le billard et les murs de la salle.

Superficies en mètres carrés des différentes pièces qui composent un appartement (M. Mandar).

	PETITS.		MOYENS.		GRANDS.		
Salons.	15.19 à	22.79	34.19 à	45.58	56.98 à	68.38	et jusqu'à 79.77
Salles.	13.30	18.99	28.49	37.99	45.58	56.98	68.38
Chambres à coucher.	11.40	15.20	24.69	30.39	37.99	45.58	56.98
Cages d'escaliers . .	9.50	13.30	18.99	24.69	30.39	37.99	45.58
Antichambres, Vestibules.	7.60	11.40	15.20	18.99	24.69	90.39	37.99
Cabinets.	5.70	7.60	11.40	15.20	18.99	22.79	30.39

489. *Cheminées.* La mode de placer des glaces sur les cheminées a fait diminuer de jour en jour leurs dimensions. Les plus graudes n'ont que 1m,95 de largeur sur 1m,30 de hauteur; souvent celles des petits appartements n'ont que 1m,25 de largeur sur 1m,00 de hauteur, et on en fait qui n'ont que 0m,80 sur 0m,80. La largeur des jambages et du manteau est le 1/10 environ de la largeur de la cheminée; ainsi, pour les premières, elle est de 0m,195; pour les secondes, 0m,125, et pour les plus petites, 0m,08. La profondeur varie de 0m,45 à 0m,80 (n° 324).

Proportions des cheminées, suivant les dimensions des pièces où elles se trouvent.

	PIÈCES					
	petites.		moyennes.		grandes.	
Largeur dans œuvre.. . . .	0m.81 à	0m.97	1m.14 à	1m.30	1m.62 à	1m.95
Hauteur de la tablette. . .	0 .89	0 .97	0 .97	1 .03	1 .14	1 .30
Largeur de la tablette. . . .	9 .27	0 .32	0 .35	0 .38	0 .40	0 .43

490. *Escaliers.* Afin que l'on ne se fatigue pas trop en montant un escalier, la distance verticale de deux paliers successifs ne doit pas dépasser 2m,50 à 3m,00.

La hauteur de la rampe varie de 0m,89 à 1m,06.

La longueur des marches varie de 1m,62 à 1m,95 pour les grands escaliers, de 1m,30 à 1m,46 pour les moyens, de 0m,97 à 1m,14 pour les petits, et de 0m,65 à 0m,81 pour ceux de dégagement.

La hauteur des marches est moyennement égale à la moitié du giron; elle varie de 0m,13 à 0m,19, mais en sens inverse du giron.

On peut déterminer la hauteur ou la largeur des marches d'escaliers·

quand l'une de ces dimensions est connue à l'aide de la formule empirique

$$2h + l = 0^m,65.$$

h hauteur de la marche;
l largeur du giron.

Si $h=0$, on a $l=0^m,65$, qui est le pas d'infanterie (38).
Si $l=0$, on a $h=0^m,325$, qui est l'espacement des échelons d'une échelle.

Faisant successivement dans la formule précédente l égale à

$0^m,27$ $0^m,30$ $0^m,32$ $0^m,35$ et $0^m,38$

on en conclut respectivement pour h:

$0^m,19$ $0^m,175$ $0^m,165$ $0^m,15$ $0^m,135$

valeurs qu'il convient d'adopter en pratique.

491. *Fourneaux potagers et fours à cuire le pain.* Les fourneaux potagers ont de $0^m,76$ à $0^m,85$ de largeur sur autant de hauteur.

Le diamètre des fours varie de $0^m,89$ à $0^m,97$ pour les petits, de $1^m,14$ à $1^m,30$ pour les moyens, et de $1^m,46$ à $1^m,62$ pour les grands. L'âtre du four s'établit à $0^m,89$ ou $0^m,97$ au-dessus du sol. La voûte ou chapelle s'élève de $0^m,35$ à $0^m,45$ au-dessus de l'âtre.

Les fours de manutention ont de $3^m,25$ à $3^m,90$ et même $4^m,20$ de diamètre.

492. *Cours.* Pour qu'un carrosse puisse tourner sans difficulté, une cour doit avoir au moins $7^m,80$ de côté.

493. *Composition de quelques maisons d'habitation, et dimensions de leurs différentes pièces.* Les dimensions des maisons rurales sont extraites de la Maison rustique du XIXe siècle.

1° *Maison de journalier à un simple rez-de-chaussée.*

Figure 2, planche II. Plan de la maison.

A cuisine dans laquelle on entre du dehors (4 mètres sur 4 mètres);
B chambre à coucher à deux lits (4 mètres sur 3 mètres);
C chambre à coucher d'enfant (4 mètres sur 2 mètres);
D petite buanderie, avec porte sur le derrière (3 mètres sur 1 mètre);
E petit garde-manger;
F latrines, sous appentis;
G petit bûcher, ou lieu fermé pour conserver les outils.

La maison a 8 mètres de largeur sur 5 mètres de profondeur dans œuvre, c'est-à-dire non compris les épaisseurs des murs, et une hauteur de 3 mètres, mesurée à la naissance du toit.

2° *Maison de journalier avec rez-de-chaussée et un étage au-dessus.*

Figure 3, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A cuisine par laquelle on entre du dehors (5 mètres sur 5 mètres);
B buanderie (3 mètres sur 3 mètres);

C petit garde-manger (2 mètres sur 1 mètre); devant est un petit espace où l'on peut loger quelques outils;
D escalier pour monter à l'étage supérieur, et sous lequel on peut placer une petite provision de bois;
O latrines placées sous un petit appentis.

Figure 4, planche II. Plan du premier étage.

E chambre à coucher à deux lits et un lit d'enfant, avec cheminée;
F autre chambre à coucher;
H armoire ou tambour fermé.

La maison a 8 mètres de largeur sur 5 mètres de profondeur dans œuvre, et 6 mètres de hauteur sous la naissance du toit.

3° *Maison double de journalier avec étage au-dessus et dépendances.* Cette disposition donne des habitations plus chaudes et plus économiques que la précédente.

Figure 5, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A porche avec armoire ou rayons pour les outils;
B cuisine (5 mètres sur 4 mètres);
C arrière-cuisine avec four ou buanderie (3 mètres sur 3 mètres);
D garde-manger un peu enfoncé en terre, et en partie sous l'escalier E;
F bûcher;
O petit cellier;
H latrines;
L toit à porcs, à double mur, pour éviter les infiltrations; au-dessus se trouve un poulailler.

Figure 6, planche II. Plan du premier étage.

M chambre à coucher à un lit;
N chambre à coucher à deux lits.

Le bâtiment a 8 mètres de profondeur dans œuvre; il a 16 mètres de face au rez-de chaussée, 8 mètres pour chaque habitation. Au 1er étage, la face n'a plus que 8 mètres, 4 mètres pour chaque habitation; les dépendances, qui ont 3 mètres de largeur, sont disposées sous appentis de chaque côté du corps principal du bâtiment. Le corps principal a 6 mètres de hauteur depuis la naissance du toit. Les dépendances ont 3 mètres de hauteur.

4° *Maison d'éclusier* (canal du Centre). Elle est destinée à loger la famille de l'éclusier, à recevoir les produits d'un jardin, et à placer une vache et un cochon.

Figure 7, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A pièce d'entrée à cheminée, contenant un lit, et pouvant servir de salle à manger (5 mètres sur 4 mètres);
B chambre à coucher contenant deux lits (5 mètres sur 3 mètres);
C pièce dans laquelle communique le four; elle peut servir à la fois de cuisine et de salle à manger (3 mètres sur 4 mètres);
D four de 1m,60 de diamètre;

E escalier pour descendre à la cave, qui est un berceau régnant sous toute la profondeur de la maison, et qui a 3m,10 de largeur sur 2m,30 de hauteur à la clef;
F escalier pour monter au grenier, qui occupe tout le premier étage, et que l'on peut disposer, au besoin, pour recevoir des lits;
GG appentis de 3 mètres sur 5 mètres et 2m,50 de hauteur, servant, l'un de magasin, et l'autre d'écurie pour recevoir deux vaches et deux cochons.

Le rez-de-chaussée a 2m,60 de hauteur; la porte d'entrée a 0m,90 de largeur et les fenêtres 0m,80; le grenier a 2 mètres de hauteur sous le faîte, il est éclairé par des lucarnes rectangulaires placées dans les murs, à l'aplomb de la porte et des fenêtres du rez-de-chaussée.

La maison a 8 mètres de largeur sur 7 mètres de profondeur dans œuvre.

5° *Habitation et dépendances pour un petit cultivateur exploitant 2 à 3 hectares de terre, exerçant un art agricole et mettant ses récoltes en meules.*

Figure 8, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

La partie *a b c d* est surmontée d'un étage distribué comme le rez-de-chaussée, et contenant les chambres à coucher. Les parties latérales *a d e f* et *b c g h* sont des appentis dont la naissance s'élève au niveau du premier étage. Les combles du corps principal et des appentis, qui ont une assez forte pente, sont encore disposés en greniers, et, au besoin, dans les combles du corps principal, on peut placer des chambres de domestiques.

A porche d'entrée;
B bûcher;
C cuisine (6 mètres sur 6 mètres);
D atelier pour placer un métier ou autre machine (4 mètres sur 9 mètres);
E arrière-cuisine ou buanderie (3 mètres sur 4 mètres);
F escalier conduisant au premier étage;
O garde-manger;
I magasin à fourrages (3 mètres sur 2m,50);
K étable pour deux ou trois vaches (3 mètres sur 4 mètres);
L laiterie (3 mètres sur 4 mètres); au-dessus de la laiterie et de l'étable se trouve le magasin à paille;
M magasin aux outils et instruments, et servant aussi de cellier (3 mètres sur 4 mètres);
N magasin aux racines, servant aussi d'aire à battre (3 mètres sur 4 mètres); au-dessus sont des greniers;
V réduit pour deux ou trois porcs (2 mètres sur 2 mètres);
P latrines;
R poulailler.

Le corps principal *abcd* a 10 mètres de largeur sur 9 mètres de profondeur et 6 mètres de hauteur.

La cuisine et l'atelier sont élevés à 0m,50 au-dessus du sol; le magasin à fourrages, la buanderie, l'étable et la porcherie sont au niveau du sol; la laiterie, le cellier et le magasin aux racines sont un peu au-dessous.

6° *Petite maison de ferme pour un propriétaire-cultivateur exploi-*

tant 10 à 12 hectares de terre à froment de première classe, et mettant ses récoltes en meules.

Figure 9, planche II. Plan du rez-de-chaussée de toute la ferme.

- A espace couvert par un petit toit en forme de fronton, reposant sur les deux poteaux *dd'*;
- D cuisine par laquelle on entre (4 mètres sur 5 mètres);
- F arrière-cuisine ou buanderie, avec escalier pour monter au premier étage (2 mètres sur 3 mètres);
- E garde-manger (1 mètre sur 1 mètre);
- G salle à manger ou de réception (3^m,50 sur 4 mètres);
- I cabinet du fermier (3^m,50 sur 4 mètres).

La partie *a a' a" a'"* forme le bâtiment d'habitation, qui a un premier étage pour recevoir le maître et sa famille pendant la nuit; les domestiques peuvent coucher dans les combles, qui sont très-élevés et forment en quelque sorte un second étage. Ce bâtiment central a 8 mètres de largeur sur 7 de profondeur, et 6 mètres de hauteur sous les naissances du toit.

Sous tout le bâtiment central se trouve un étage souterrain auquel on descend par l'escalier B. Cet étage souterrain comprend un fournil placé sous la salle G, un cellier aux boissons placé sous la cuisine D, la masse du four se trouve dans l'angle de ce cellier; enfin, deux celliers aux racines, l'un sous le cabinet I, et l'autre sous les parties EFH.

- K hangar aux voitures (4 mètres sur 4 mètres);
- L laiterie (3 mètres sur 4 mètres);
- M échaudoir pour la laiterie (4 mètres sur 1^m,50);
- N étable pour cinq à six vaches (9 mètres sur 4 mètres);
- O porcherie;
- P latrines;
- V magasin à foin (5 mètres sur 4 mètres);
- R sellerie, hache-paille, coffre à avoine (2^m,50 sur 4 mètres);
- S écurie pour deux chevaux (4 mètres sur 4 mètres);
- T aire à battre avec grenier au-dessus (7 mètres sur 4 mètres);
- U basse-cour; la partie couverte est divisée en compartiments, l'autre partie n'est pas couverte.

Les magasins à paille sont au-dessus de la laiterie, de la sellerie et de l'écurie. Les combles des bâtiments latéraux sont très-inclinés et à deux pans, ce qui permet d'y placer les greniers et magasins.

- Z puits ou pompe;
- Y tas de fumier;
- X fosse à purin.

Au delà du fumier sont rangées les meules de récoltes.

7° *Bâtiments d'habitation et d'exploitation pour une ferme en pays de plaine, où on exploite 34 hectares en terres à froment de première*

classe, et où on récolte, terme moyen, dans un assolement de cinq années, 390 *hectolitres de froment et* 210 *d'orge, semence déduite*, 1060 *quintaux métriques de paille et autant de foin. Les bêtes de trait sont trois chevaux de taille moyenne; les bêtes de rente, nourries constamment à l'étable, sont vingt vaches du poids de* 350 *à* 400 *kilog., un taureau, quatre veaux, six porcs et des oiseaux de basse-cour. Une partie des récoltes des céréales seule est engrangée, l'autre est mise en meules.*

Figure 10, planche II. Plan du rez-de-chaussée de tous les bâtiments.

La maison d'habitation occupe la partie *a a' a'' a'''*; elle a un premier étage pour recevoir le personnel de la ferme pendant la nuit. On peut, au besoin, faire des chambres à coucher de domestiques dans les combles.

m cuisine (5 mètres sur 5m,50);
n arrière-cuisine servant de fournil et d'échaudoir pour la laiterie, elle contient l'escalier qui conduit à l'étage supérieur (3 mètres sur 5 mètres);
p salle de réception ou à manger (4m,25 sur 4 mètres);
q cabinet du fermier (4m,25 sur 4 mètres).

Sous ce rez-de-chaussée se trouve un étage demi-souterrain, composé :

1° D'une laiterie voûtée de 5 mètres sur 4m,50, placée sous l'arrière-cuisine *n* et une partie de la cuisine *m*; on descend à la laiterie par l'escalier *r* situé sous le hangar A. La laiterie est garnie de tables en pierre et dallée; un dégorgeoir, communiquant avec un puisard, produit l'écoulement des eaux;

2° D'un cellier aux boissons et au charbon, placé sous le cabinet *q*;

3° De deux celliers aux racines et aux pommes de terre, placés, l'un sous la cuisine *m*, et l'autre sous la salle à manger *p*; on descend aux celliers par l'escalier voûté *s*.

A petit hangar, par lequel on entre dans l'arrière-cuisine et descend à la laiterie; il sert à faire sécher les ustensiles de celle-ci (4 mètres sur 1m,50);
B garde-manger (1m,50 sur 1m,50);
C étable pour les vaches qui vêlent, malades ou à l'engrais, et un taureau (4 mètres sur 6 mètres);
D étable pour vingt-quatre vaches (14 mètres sur 6m,50);
E étable pour quatre veaux (2 mètres sur 3 mètres);
F réduit pour les ustensiles de pansement des vaches;
G magasin ou hangar à foin (9 mètres sur 4 mètres);
H toits à porcs; I latrines pour les hommes (6 mètres sur 5 mètres);
K écurie pour trois chevaux (6 mètres sur 4 mètres);
L sellerie, bache-paille, coffre à avoine (6 mètres sur 2 mètres);
M hangar pour les voitures et instruments (8 mètres sur 6 mètres);
N grange (10 mètres sur 6 mètres);
O basse-cour;
P bûcher;
Q latrines pour le fermier et les servantes :
R niche à chien;
SSS réservoirs à urine;
T puits ou citernes, avec auge pour abreuver les animaux.

Le tas de fumier et la fosse à purin sont placés en dehors, devant les étables. Les

meules de récoltes sont également placées en dehors et en vue de la maison d'habitation.

L'étage souterrain a 2m,50 de hauteur, le bâtiment d'habitation 6 mètres, les étables et les écuries 4 mètres, la grange et le magasin à fourrages 5 mètres.

Toute la superficie du terrain occupé par l'établissement est de 7 ares ou 700 mètres carrés ; la façade a 24 mètres de longueur, et la profondeur est de 29m.50.

Le bâtiment d'habitation couvre 100 mètres carrés, et les bâtiments d'exploitation 400, en tout 500 mètres carrés ou 5 ares. Le magasin à foin et les greniers au-dessus des étables, des écuries et des hangars présentent une capacité de 400 mètres cubes, ce qui est suffisant pour loger les fourrages nécessaires pour quatre mois d'hivernage.

8° *Maison de ville composée d'un rez-de-chaussée et d'un premier, pour une seule famille.* On suppose, comme cela a lieu généralement, que l'on ne peut prendre jour que sur deux faces.

Figure 11, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A cage de l'escalier (5m,70 sur 2m,75);
A' vestibule et antichambre (5m,70 sur 2m,50);
B office (3m,70 sur 2m,75);
C cuisine (5m,30 sur 3m,70);
D salle à manger (5m,30 sur 7m,70);
E buffet;
E' serre:
F salon (8 mètres sur 7m,70);
G chambre à coucher (5m,30 sur 6 mètres, comptés du devant de l'alcôve);
H garde-robe;
H' dégagement avec escalier pour monter à un petit entre-sol placé au-dessus des cabinets;
I cabinet de toilette;
K armoires;

Le vestibule au rez-de-chaussée, et le palier de l'escalier dans les étages supérieurs doivent, autant que possible, donner entrée à la cuisine et à l'antichambre ou pièce d'introduction, et il conviendrait que l'antichambre communiquât directement avec la salle à manger, le salon et la chambre à coucher, afin de rendre toutes les pièces de l'appartement indépendantes les unes des autres.

Figure 12, planche II, Plan du 1er étage.

L antichambre;
MMMM chambres à coucher;
NNN chambres de domestiques;
PPP cabinets;
OO cabinets d'aisance;
R escalier conduisant au grenier.

9° M. Moitié, de Coulommier, architecte, nous communique *le plan d'un appartement de ville pour une famille d'une certaine aisance*, qu'il a disposé dans une maison qu'il vient de faire construire à Paris, et qui paraît réunir toutes les commodités désirables. La figure 70 représente ce plan à l'échelle de 3 millimètres pour mètre.

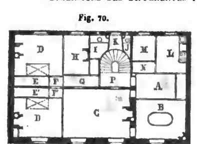


Fig. 70.

P palier (1^{m},20 sur 2^{m},80) ;
A antichambre (3^{m},55 sur 2^{m},30);
B salle à manger (3^{m},50 sur 4^{m},50) ;
C salon (4^{m},50 sur 6^{m},15);
DD chambres à coucher (4^{m},35 sur 3^{m},65);
EE' garde-robes (0^{m},80 sur 3^{m},15);
FF' dégagements;
G couloir (1 mètre sur 3^{m},15) ;
H cabinet de travail ou chambre à coucher d'enfant (3^{m},45 sur 2^{m},40) ;
I lieux à l'anglaise ;
J cabinet d'aisances pour les domestiques ;
L cuisine (2^{m},75 sur 3^{m},30);
M office (1^{m},80 sur 2^{m},20);
N garde-manger (1^{m},80 sur 1 mètre) ;
Un passage de 0^{m},80 est destiné au service de la salle à manger;
K tambour à jour dans toute la hauteur, pour aérer l'escalier, en permettant aux croisées de s'ouvrir. A chaque étage le plancher est profilé, ce qui forme des banquettes destinées à recevoir des corbeilles de fleurs.

10° M. Moitié nous communique également le plan d'un appartement de ville disposé pour une famille riche. La figure 71 en représente la disposition à l'échelle de 3 millimètres pour mètre.

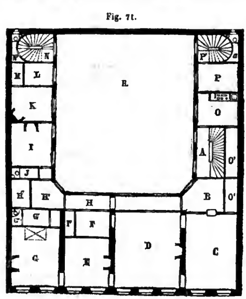


Fig. 71.

A escalier principal (2^{m},50 sur 4^{m},50) ;
B antichambre (4 mètr. sur 3 m.);
C salle à manger (4^{m},50 sur 6^{m},90). Un poêle, placé dans la cloison, chauffe la salle à manger et l'antichambre;
D salon (6 mètres sur 7 mètres);
E boudoir de madame ou petit salon (4 mètr. sur 4^{m},30) ;
F cabinet dans lequel on pourra mettre un lit de repos ou prendre des bains (3 mètres sur 2^{m}.50) ;

F′ dégagement ;
G chambre à coucher de madame ($4^m,50$ sur $5^m.30$) ;
G′ garde-robes ;
G″ anglaises ;
H galerie de dégagement ;
H′ cabinet de toilette ;
H″ atrium ou petite cour donnant de la lumière et de l'air aux cabinets d'aisances.

L'aile de gauche forme l'appartement de Monsieur :

I chambre à coucher ($3^m,60$ sur 4 mètres) ;
J garde-robes et aisances ;
K cabinet de travail ($3^m,60$ sur 3 mètres) ;
L antichambre ($2^m,25$ sur 2 mètres) ;
M cartonnier ;
N escalier de service ;
N′ aisances pour les gens.

Si l'aile de gauche était destinée à des enfants :

I serait la chambre à coucher ;
K la salle d'étude ;
L la chambre de la gouvernante ;
M un cabinet.

Aile de droite :

O cuisine ($3^m,60$ sur $2^m,80$) ;
O′ couloir de 1 mètre pour le service de la salle à manger ;
P office ($3^m,60$ sur $2^m,50$) ;
P′ escalier de service ;
a aisances pour les gens ;
R grande cour ;

11° *Maison de campagne projetée par Mandar, pour être construite sur le penchant d'un coteau ; ce qui a permis de mettre le premier étage au niveau de la cour, du côté de la montagne, et le rez-de-chaussée au niveau du jardin sur les trois autres faces de la maison.* Le bâtiment principal est un pavillon carré de $11^m,70$ de côté. Le rez-de-chaussée a $2^m,65$ de hauteur, non compris l'épaisseur du plancher, qui est de $0^m,38$; le premier a $3^m,17$ et son plancher $0^m,35$, le second $2^m,92$ et son plancher $0^m,30$, le troisième $2^m,44$ et son plancher $0^m,27$.

Figure 13, planche II. Plan du premier étage.

A côté de la cour ;
A′ côté faisant face au jardin ;
B vestibule par lequel on entre du côté de la cour ;
B′ escalier conduisant aux étages supérieurs ; il est éclairé par le toit, qui est surmonté d'un belvéder ;
C salle à manger dans laquelle est un poêle.

Pour une maison de ville, il faudrait éviter de passer directement du vestibule dans la salle à manger.

DD buffets;
E salon (3^m,90 sur 9 mètres);
F second vestibule par lequel on entre du côté du jardin;
G chambre à coucher principale (3^m,90 sur 5^m,85);
H cabinet de toilette (1^m,46 sur 2^m,90);
I boudoir contenant un canapé (2^m,03 sur 3^m,25). La cheminée, ainsi que celles du salon et de la chambre à coucher sont placées sous les appuis des fenêtres;
K lieux à l'anglaise (1 mètre sur 1^m,46); il y en a d'autres placés dans les angles de l'escalier;
L chambre de domestique (1^m,80 sur 3^m,25);
M terrasse placée au niveau du premier étage, et régnant sur toute la façade du côté du jardin (largeur 1^m,90);
N escalier à double rampe pour descendre de la terrasse au jardin;
N'N' escaliers pour descendre de la cour dans le jardin sans passer par la maison.

Le rez-de-chaussée contient:

Une cuisine placée sous la salle à manger C; elle communique au dehors par une porte placée au pied de l'escalier N'. Un escalier qui débouche sous l'escalier B' du premier étage, établit une communication intérieure entre le premier étage et le rez-de-chaussée, et facilite le transport des plats, de la cuisine à la salle à manger;

Une office et des dépendances de la cuisine, placées sous le salon E;

Une salle de bain sous le vestibule F;

Une salle de billard sous la chambre à coucher G et le cabinet de toilette H; elle communique au dehors par une porte placée au pied de l'escalier N';

Une cave sous le boudoir I et la chambre de domestique L;

Une grotte sous la terrasse.

Figure 14, planche II. Plan du deuxième étage.

M antichambre;
OO couloirs de 0^m,81 de largeur;
PPPP chambres contenant chacune une alcôve de 2^m,10 sur 1^m,13;
QQQ cabinets de toilette.

Le troisième étage est distribué comme le deuxième, à cela près que l'on diminue le cabinet placé au-dessus du vestibule pour prendre les lieux à l'anglaise.

Au premier, les cheminées sont placées en face des fenêtres; au deuxième, elles sont dans les entr'axes, et au troisième dans les angles des pièces.

La grille d'entrée dans la cour A se trouve en face du bâtiment principal, et tous les bâtiments accessoires: logement du jardinier et ses dépendances, basses-cours, écuries, remises, étables, laiterie, poulailler, colombier, volière, sont disposés autour de la cour. Derrière les bâtiments accessoires, à droite, quand de l'extérieur on entre dans la cour, se trouve le jardin fleuriste, en avant duquel, sur l'alignement du pavillon principal, est placée l'orangerie.

494. *Bains.* A l'établissement des bains Saint-Sauveur, rue Saint-

Denis, à Paris, les cabinets ont 3^m,15 de longueur, 1^m,56 de largeur, et 2^m,30 de hauteur au rez-de-chaussée, 2^m,16 au premier et 2^m,28 au second. Les corridors, dans lesquels ouvrent tous les cabinets, ont 2^m,60 de largeur et une hauteur égale à celle des cabinets. Il conviendrait, pour que la vapeur ne se déposât pas sur les habillements des baigneurs, que chaque cabinet fût divisé en deux parties séparées, l'une pour la toilette et l'autre pour le bain (330).

495. *Salle de spectacle.* Pour que les spectateurs ne soient pas gênés, il faut compter sur un espace de 0^m,50 en largeur et 0^m,75 en longueur, c'est-à-dire que la distance d'axe en axe de deux banquettes consécutives doit être de 0^m,75.

Pour que tous les spectateurs voient bien ce qui se passe sur la scène, le parterre doit aller en s'élevant de 0^m,10 à 0^m,13 par banquette, et pour les galeries, une droite s'appuyant sur les arêtes des banquettes doit venir rencontrer l'arête de l'avant-scène, et même passer au-dessous si cela est possible.

La largeur des couloirs doit être de 2 mètres au moins ; elle va à 3 mètres et même plus quand chaque galerie contient un grand nombre de spectateurs, et qu'il n'y a que deux escaliers pour descendre.

496. *Magasins à blé.* Pour conserver le blé, on l'étale en couches sur les planchers des divers étages du magasin. L'épaisseur des couches est de 0^m,50 pour le blé d'un an, de 0^m,60 pour celui de deux ans, et de 0^m,70 pour celui de trois. On laisse entre les couches et le mur un espace libre de 1 mèt. de largeur, et dans le sens de la longueur, tous les 15 à 20 mèt., on interrompt les couches sur une distance de 4 à 5 mèt., cela permet de changer le blé de place pour l'aérage.

Dans les grandes villes, on établit des magasins à blé qui ont jusqu'à huit étages, y compris les combles et le rez de-chaussée, que l'on utilise comme les autres étages. La hauteur de chaque étage est de 3 mèt.; cela suffit pour aérer le blé, auquel on fait décrire, en le lançant à la pelle, une courbe dont la hauteur est de 2^m,50. La longueur des greniers dépend de leur importance, et leur largeur varie de 12 mèt. au minimum, à 20 mèt. au maximum.

On calcule les dimensions des murs et des poteaux pour résister au poids du blé emmagasiné. Le blé pèse moyennement 75 kil. l'hectolitre.

Les poteaux soutenant les planchers sont espacés de 4 à 5 mètres, et, afin d'éviter le tassement provenant de la dessiccation du bois, on place les poteaux des divers étages bout à bout, sans les interrompre par des pièces de bois posées à plat. La dessiccation ne change pas la longueur des pièces de bois, au lieu que normalement aux fibres, le sapin diminue de 1/75, et le chêne de 1/83. Le bois du balancier de l'ancienne machine à vapeur de Chaillot, dont la dessiccation s'est opérée à une température assez élevée, a diminué, d'après M. Mary, de 1/33.

497. *Écuries.* L'espace occupé par un cheval est de 2^{m},60 en longueur, sur 1^{m},30 à 1^{m},45 en largeur, quand une simple barre de bois le sépare de son voisin; s'il en est séparé par une cloison, cette largeur varie de 1^{m},50 à 1^{m},70; les largeurs sont comptées entre les barres ou cloisons de séparation. Pour un seul rang de chevaux, la largeur de l'écurie est de 4^{m},30, ce qui donne un passage de 1^{m},70 derrière les chevaux. La largeur de l'écurie est portée à 8^{m},60, s'il y a deux rangs de chevaux, avec un passage le long de chaque mur, c'est-à-dire si les chevaux d'un rang font face à ceux de l'autre, et elle est de 7^{m},70 si les chevaux font face aux murs, c'est-à-dire s'il n'y a qu'un passage entre les deux rangs.

La hauteur des écuries est suffisante quand elle atteint 3 mèt.; très-souvent on la porte à 3^{m},80.

D'après M. Nadault de Buffon, il convient de limiter la hauteur des écuries à 3 mèt., et de porter leur largeur à 4^{m},50 ou mieux 5 mèt.; dimensions qu'il conseille également d'adopter pour les étables.

La mangeoire a son arête supérieure à 1^{m},10 au-dessus du sol; sa profondeur est de 0^{m},25, et sa largeur de 0^{m},30 en haut et 0^{m},20 au fond.

Le râtelier a son arête inférieure à 1^{m},70 au-dessus du sol, et son arête supérieure à 2^{m},20. Son inclinaison est telle, qu'avec ces hauteurs, sa largeur est de 0^{m},65. Ses fuseaux sont écartés de 0^{m},08 à 0^{m},13.

Les fenêtres sont demi-circulaires, leur diamètre est de 0^{m},90 à 1 mèt.; on les place à 1^{m},70 ou 1^{m},80 au-dessus du sol, et le moins possible en face des chevaux, afin que la lumière ne leur arrive pas directement sur les yeux. Les écuries doivent être convenablement éclairées (127).

Pour la santé des chevaux, l'air d'une écurie doit pouvoir se renouveler facilement à l'aide de nombreuses ouvertures pratiquées dans le haut des murs en regard, et disposées de manière que les chevaux ne soient pas dans les courants d'air qui s'établissent. Des ouvertures pratiquées dans le bas des murs faciliteraient beaucoup le renouvellement de l'air. Il convient du reste de pouvoir fermer ces ouvertures à volonté.

Le sol des écuries doit être solide, afin qu'il résiste aux pieds des chevaux; tout à fait imperméable, pour que les urines ne s'y infiltrent pas, et légèrement incliné sous les chevaux, afin que les urines s'écoulent facilement vers les rigoles pratiquées pour leur donner écoulement hors de l'écurie. Les pavés en grès et les madriers en bois conviennent à la confection du sol des écuries.

Les portes d'écuries ou d'étables ne doivent pas avoir moins de 1^{m},20 de largeur, sur 2^{m},20 à 2^{m},40 de hauteur, afin que les chevaux harnachés ou les vaches pleines puissent facilement y passer; elles sont à deux vanteaux.

498. *Étables.* Une vache, plutôt grosse que petite, nourrie constam-

ment à l'étable ou en partie au pâturage, exige un espace de 1m,50 en largeur, sur 2m,40 à 2m,60 en longueur, y compris l'auge et le râtelier. Un bœuf de trait, plutôt fort que de petite taille, exige un espace de 1m,35 en largeur sur 2m,40 à 2m,60 en longueur, et un bœuf d'engrais de forte taille, le même espace que les vaches. Un passage de 1 mètre est suffisant derrière les bêtes à cornes. La hauteur qu'il convient de donner aux étables est de 3 mètres, on la porte souvent à 3m,50.

Comme pour les écuries (497), il convient de pratiquer dans les murs des ouvertures pour faciliter l'aérage. Il convient également que les étables soient suffisamment éclairées.

Des rigoles pratiquées derrière les animaux donnent un écoulement facile aux urines. Le sol des étables doit être incliné de 0m,01 par mètre vers ces rigoles, et élevé de 0m,20 au-dessus du sol environnant. Il convient de le faire en pavés larges, pour que les pieds des vaches y reposent facilement; les dalles, les briques, les planches, une couche de béton ou de ciment hydraulique sont les matériaux qu'il convient d'employer, au moins pour la place où se tient le bétail.

499. *Bergeries.* Les moutons de forte taille, dont 1/4 à 1/5 en brebis portières, et qui ne sont soumis à la tonte qu'une fois par an, exigent 0m,41 de longueur de râtelier chacun, et occupent, en moyenne, 1mq,05 de surface. Ceux qui sont tondus deux fois par an exigent 0m,35 de râtelier et 0mq,95 de surface. Les agneaux de 4, 6 ou 9 mois exigent respectivement 0m,24, 0m,27 et 0m,30 de râtelier. On comprend dans l'estimation de la surface convenable à chaque bête, l'espace nécessaire aux râteliers, aux cloisons de séparation, au passage et aux agneaux.

Les portes et les fenêtres d'une bergerie doivent être vastes, le sol et le bas des murs doivent être cimentés et imperméables. Il serait convenable qu'il y eût, auprès de la bergerie, une petite cour où les moutons pussent aller prendre l'air à volonté. Du reste, il convient, comme pour les étables, de disposer, vers le haut et vers le bas des murs, des ouvertures qui renouvellent constamment l'air de la bergerie. Un magasin de 4 mètres de largeur, sur 12 à 15 mètres de longueur et 4m,50 de hauteur suffit au service journalier des fourrages et racines pour 500 à 800 bêtes, et pendant le temps de la tonte pour tous les travaux de cette opération.

La hauteur d'une bergerie varie de 2m,60 à 3 mètres; elle atteint même quelquefois 4 mètres. Les râteliers sont élevés à 0m,40 ou 0m,60 au-dessus du sol; ils sont inclinés en sens contraire de ceux des chevaux, afin que la poussière ne tombe pas sur les animaux, ce qui nuirait à leur santé et gâterait leur toison. Une petite auge en voliges, fixée au bas du râtelier, retient les parties de nourriture qui peuvent s'en échapper, et permet d'incliner le râtelier en avant, disposition qui rend plus facile aux moutons d'atteindre les dernières parties de fourrage qui s'y trouvent.

500. *Porcheries.* Pour une forte truie, il faut compter sur 3 mètres carrés à $3^{m^c},50$ de surface ; pour un verrat, sur 2 mètres carrés à 3 mètres carrés ; pour un cochonneau, jusqu'à six mois, sur 1 mètre carré, et au-dessus de cet âge, sur $1^{m^c}.35$ à $1^{m^c}.50$.

On doit changer souvent la litière d'une porcherie, et faciliter l'écoulement des eaux en inclinant le sol, que l'on doit faire en dalles ou en bois, afin que les porcs ne puissent pas l'attaquer.

Le porc est le seul animal qui, dans les basses-cours ou dans les écuries, a conservé assez d'instinct de propreté pour ne déposer jamais volontairement ses excréments sur la litière où il repose. Le cheval, le bœuf, le mouton satisfont leurs besoins où ils se trouvent; s'ils sont couchés, ils ne se lèvent point pour fienter, et dorment sur leurs ordures. Le porc, au contraire, quand il est libre dans sa loge, choisit toujours la place la plus éloignée, et si on essaye de l'attacher, il se recule autant que sa longe le lui permet.

501. *Laiterie et colombier.* La température de la laiterie doit être de 15° à peu près, en été comme en hiver. La plus grande propreté doit y régner.

Le colombier est généralement une tour ronde ou polygonale, dans laquelle on dispose des nids pour recevoir les pigeons. Comme le pigeonnier ne descend pas jusqu'au sol, on dispose quelquefois la laiterie, qu'il faut avoir soin de voûter, au rez-de-chaussée. On doit éviter cette disposition, parce que, malgré toutes les précautions que l'on peut prendre, l'odeur pénétrante du colombier peut arriver jusque dans la laiterie.

502. *Granges. Volume et composition des récoltes.* Afin que les voitures chargées des récoltes puissent entrer facilement dans les granges, on donne aux portes, qui sont à deux vantaux, $3^m,30$ à 4 mèt. de largeur, sur 4 mètres à $4^m,50$ de hauteur. Il conviendrait qu'il y eût deux portes, l'une pour l'entrée des voitures chargées, et l'autre, placée sur le côté opposé de la grange, pour la sortie des voitures déchargées.

Les granges ont 8, 10, 12 et même 15 mètres de largeur; mais comme ces dernières dimensions exigeraient des pièces trop fortes pour la charpente, on place des poteaux intermédiaires. Ces poteaux ont l'avantage de soutenir les tas de gerbes quand on dégarnit une partie de la grange sans toucher aux autres; cette disposition permet aussi de faire les granges plus ou moins larges. La hauteur des granges, sous l'entrait, ne doit pas dépasser 7 à 8 mètres.

Pour une récolte annuelle de 30 000 gerbes de 6 kilog. chacune ou 180 000 kilogram. de divers grains, il faudrait deux aires à battre, de chacune 12 mètres de longueur sur $4^m,50$ de largeur et $4^m,50$ de hauteur.

Volume moyen pour les bonnes et mauvaises années, de 100 kilog. de différents produits, au moment des récoltes.

		m. cu.
1°	De gerbes de froment d'hiver.	0,920
2°	*id.* do seigle d'hiver	0,960
3°	*id.* de grosse orge.	0,880
4°	*id.* d'avoine.	0,900
5°	*id.* de pois et vesces.	1,280
6°	De trèfle rouge porte-graine.	1,080
7°	*id.* blanc.	0,880
8°	De foin de trèfle ou de son regain.	0,960
9°	*id.* de prairie ou de son regain.	0,920

Quand, dans une grange, on accumule plusieurs des cinq premiers produits, il faut compter, terme moyen, sur 1 mètre cube par 100 kilogrammes de gerbes, à cause des séparations qu'il faut laisser entre ces différents produits. On doit compter sur le même volume pour les foins de trèfle ou de prairie et pour leurs regains.

Pendant les premiers temps d'engrangement, les récoltes diminuent de poids, par suite d'une dessiccation plus complète, et de volume, par suite du tassement.

Composition moyenne de 100 kilog. de gerbes de différents grains.

DÉSIGNATION.	SOL			
	FERTILE.		MOINS FERTILE.	
	Grain.	Paille.	Grain.	Paille.
	kil.	kil.	kil.	kil.
Froment.	30	70	40	60
Seigle.	25	75	36	64
Orge.	35	65	45	55
Avoine.	30	70	42	58
Pois et vesces.	20	80	24	76

503. *Eau nécessaire dans une ferme* (Maison rustique au XIXe siècle).

DÉSIGNATION DES INDIVIDUS.	CONSOMMATION	
	journalière.	annuelle.
	litres.	mèt. cub.
Une personne adulte, pour tous ses besoins.	10	3.60
Un cheval de taille moyenne, nourri avec des aliments secs, y compris l'eau nécessaire au pansement et au lavage des écuries et des harnais.	50	18.00
Une bête à cornes nourrie en vert une partie de l'année, y compris l'eau nécessaire au pansement et au nettoyage des étables.	30	11.00
Les moutons, qui pâturent une partie de l'année et reçoivent souvent des racines en hiver, tout compris.	2	0.73
Les porcs, qui consomment en partie en boissons les eaux du ménage domestique, peuvent être abreuvés et nettoyés (par tête) avec	3	1.80

A l'aide de ce tableau, on déterminera facilement la quantité d'eau nécessaire aux besoins d'une ferme quelconque (176).

MATÉRIAUX EMPLOYÉS DANS LES CONSTRUCTIONS.

504. *Division géologique des terrains.* Avant de commencer l'étude des matériaux employés dans les constructions, nous croyons convenable de donner la classification des terrains composant l'écorce minérale du globe, afin d'être guidé dans la recherche des gisements de ces matériaux.

Série des divisions de terrains admises aujourd'hui par les géologues, avec les indications des principales roches qui les composent et le système de soulèvement qui les caractérise. Les formations sont rangées dans l'ordre descendant, c'est-à-dire en commençant par les plus modernes.

1er GROUPE. — Formation contemporaine.

Terrains d'alluvion qui remplissent les vallées des fleuves.
Volcans modernes éteints et brûlants. Les grands volcans des Andes ont été soulevés pendant cette période.

TERRAIN TERTIAIRE.

2° GROUPE. — Terrain tertiaire supérieur.

Système	Terrains
Système de la chaine principale des Alpes.	Couches de sables et alluvions anciennes, tuf à ossements fossiles. Les éruptions de trachytes et de basaltes correspondent en grande partie à cette époque.

3° GROUPE. — Terrain tertiaire moyen.

Système	Terrains
Système des Alpes occidentales.	Calcaire d'eau douce avec meulières ; contient souvent des lignites. Grès de Fontainebleau.

4° GROUPE. — Terrain tertiaire inférieur.

Système	Terrains
Système des îles de Corse et de Sardaigne.	Marnes avec gypse, ossements de mammifères. Calcaire grossier. Argile plastique avec lignites.

TERRAIN SECONDAIRE.

5° GROUPE. — Terrain crétacé supérieur.

Système	Terrains
Système de la chaine des Pyrénées et de celle des Apennins.	Assise calcaire puissante, appelée la *craie*, avec interposition de couches de silex.

6° GROUPE. — Terrain crétacé inférieur.

Système	Terrains
Système du mont Viso.	Craie tuffeau de la Touraine. Grès ordinairement verdâtre, ce qui lui a fait donner le nom de *grès vert*. Sables ferrugineux.

7° GROUPE. — Terrain jurassique.

Système	Terrains
Système de la Côte-d'Or.	Couches calcaires, plus ou moins compactes et marneuses, alternant avec des couches d'argile. On les divise en plusieurs étages. Les étages supérieurs portent le nom de *calcaire oolithique*. L'étage inférieur est appelé *lias*. Grès inférieur ou *lias*.

8° GROUPE. — Terrain de trias.

Système	Terrains
Système de Thuringerwald. .	Marnes de couleurs variées, qu'on appelle *marnes irisées*, renfermant souvent des amas de gypse et de sel gemme. Calcaire très-coquillier, auquel on donne le nom de *muschelkalk*. Grès de couleur variée, qui est appelé *grès bigarré*.

9° GROUPE. — Terrain du grès des Vosges.

Système	Terrains
Système du Rhin.	Poudingues et grès.

10° GROUPE. — Terrain pénéen.

Système	Terrains
Système des Pays-Bas et du pays de Galles.	Assise de calcaire mêlée de schiste que l'on appelle *zechstein*. Assise de poudingue et de grès appelé *nouveau grès rouge*.

TERRAIN DE TRANSITION.

11° GROUPE. — Terrain carbonifère.

Système du nord de l'Angleterre.	Grès, schistes avec couches de houille et de fer carbonaté. Calcaire carbonifère ou calcaire bleu, avec couches de houille.

12° GROUPE. — Terrain devonien.

Système des ballons des Vosges et des collines du bocage de la Normandie.	Couches puissantes de grès appelé *vieux grès rouge*, renfermant des couches d'anthracite.

13° GROUPE. — Terrain silurien.

. . . .	Calcaire, schiste ardoisier, grès à gros grains appelé *grauwacke*.

14° GROUPE. — Terrain cambrien.

Système du Westmoreland et du Hundsruck, en Écosse. .	Calcaire compacte, schiste argileux. Ces roches ont souvent une texture cristalline.

TERRAIN PRIMITIF.

15° GROUPE. — Roches primitives.

. . . .	Granites et gneiss formant la base principale de la partie intérieure du globe, accessible à nos moyens d'observation.

505. *Pierres naturelles* (*Art.* n°ˢ 11 et suivants). Rondelet, dans son traité sur l'art de bâtir, divise les pierres naturelles en quatre classes.

506. *Première classe.* Elle comprend les pierres argileuses, magnésiennes, etc., c'est-à-dire les asbestes ou amiantes, les micas, les vrais talcs, les pierres ollaires, les schistes ou ardoises de différentes espèces, et les roches appelées *de corne;* elle comprend aussi les basaltes, les pierres de touche, les pierres à rasoir et une foule d'autres qui ne sont pas en usage dans l'art de bâtir. Les caractères distinctifs de ces pierres sont de ne pas faire effervescence avec les acides, de durcir au feu ordinaire et de ne se réduire ni en chaux ni en plâtre.

507. *Deuxième classe.* Elle comprend les pierres calcaires, qui sont celles dont l'usage est le plus fréquent dans les constructions. Elles se réduisent en chaux par l'action du feu; elles font effervescence avec les acides, dans lesquels elles se dissolvent presque complétement; elles ne donnent point d'étincelles sous le briquet.

Les pierres à bâtir employées à Paris et dans presque toute la France sont calcaires.

On en distingue cinq espèces propres à être employées comme pierre de taille, ce sont :

1° *Le liais*, qui réunit toutes les qualités d'une bonne pierre de taille; son grain est fin, sa texture compacte; il se taille bien et résiste à toutes les intempéries de l'air quand il a été tiré de la carrière par un temps

convenable; il est sujet à se geler quand il est employé avant d'avoir essuyé son eau de carrière.

On distingue trois espèces de liais, le *liais dur*, le *liais Ferault* et le *liais rose.*

Le *liais dur* ou *franc liais* est d'un grain fin, et d'une texture compacte et uniforme; c'est une des plus belles pierres des environs de Paris. Les anciennes carrières de la barrière Saint-Jacques et du Clos des Chartreux étant épuisées, on l'extrait maintenant des plaines de Bagneux et d'Arcueil; les carrières de Clamart en fournissent aussi quelques beaux morceaux. La hauteur de son banc varie de 25 à 30 cent., et on en extrait des blocs qui ont de 3 à 4 mètres de longueur, sur 1m,50 à 2 mètres de largeur. Il est particulièrement employé pour les marches d'escalier, les cimaises, les tablettes et les acrotères de balustrades; on en fait aussi des chambranles de cheminées, des dalles et autres ouvrages analogues qui exigent de la beauté et peu d'épaisseur de banc.

Le *liais Ferault* ou *faux liais* est aussi dur que le précédent, mais d'un grain bien plus gros. Il se trouve quelquefois dans les mêmes carrières que le premier, sous une hauteur d'appareil de 0m,35 à 0m,40. On l'emploie aux mêmes usages, mais surtout pour les ouvrages qui ont plus d'épaisseur.

Le *liais rose* est plus tendre que les deux variétés précédentes. Il se tire des carrières de Maison-Alfort et de Creteil, où la hauteur de banc est de 0m,25, à 0m,30; on en extrait des carrières de l'Ile-Adam dont la puissance varie de 0m,30, à 0m,40. Ce liais s'emploie particulièrement pour faire les carreaux de salle à manger et d'antichambres; on en construit aussi des tablettes et des chambranles de cheminées.

En général, on donne le nom de liais à toutes les pierres dures de bas appareil dont on fait usage à Paris.

2° *Cliquart.* On désigne ainsi une pierre d'un grain fin et égal, et de très-bon appareil, contenant peu de débris coquilliers. Cette pierre est devenue rare, les carrières qui en fournissaient le plus étant presque toutes épuisées; on en extrait cependant encore quelques blocs, de 0m,30, à 0m,35 d'épaisseur, des carrières de Montrouge et de Vaugirard. On tire une pierre qui remplace le cliquart dans les plaines de Bagneux, de Clamart et de Val-sous-Meudon.

3° La *roche*, qui est une pierre très-dure et quelquefois coquilleuse; elle se trouve ordinairement en plusieurs bancs superposés. La meilleure se tire des carrières du fond de Bagneux, de Châtillon et de la Butte-aux-Cailles, près de Bièvre; elle a généralement de 0m,45 à 0m,70 de hauteur de banc, y compris très-souvent 0m,10 à 0m,15 d'épaisseur d'une pierre très-coquilleuse. Les carrières d'Arcueil fournissent une roche qui est très-bonne, quand on a eu soin de bien ébousiner les lits, ce qui oblige de réduire la hauteur du banc de 0m,40 ou 0m,45 à environ 0m,35.

On extrait également des pierres de roche dans les plaines du Bel-

Air, de Fleury, de Montrouge, etc.; mais il faut apporter beaucoup de soin dans leur choix; elles contiennent parfois beaucoup de fils que les ouvriers carriers cachent au moyen d'une houe de la couleur jaunâtre des pierres. Les carrières d'Ivry fournissent une roche assez fine, très-souvent coupée par des fils et dont la hauteur de banc est d'environ 0m,40 à 0m,45. A Vitry (Seine), on trouve une roche de 0m,30 à 0m,35 de hauteur et d'un grain très-fin, qui est recherchée à cause de la grande dimension de ses blocs; on l'emploie pour les balcons et particulièrement pour les monuments funéraires; quoiqu'elle paraisse, en général, très-saine, lorsqu'on l'emploie avant qu'elle ait jeté son eau de carrière, il se produit, après deux ou trois ans d'exposition à l'air, une infinité de petits fils qui finissent par la détériorer entièrement; plusieurs tablettes recouvrant les murs d'escarpe de l'enceinte de Paris, faites de cette pierre tirée dans la mauvaise saison, sont maintenant dans un état complet de dégradation.

On emploie aussi à Paris et dans ses environs différentes autres espèces de pierres de roche dure qui sont très-estimées et parmi lesquelles on distingue celle de Saillancourt, qui fournit des blocs de très-grandes dimensions, et que l'on a employée pour les parapets du pont de Neuilly; celles de Saint-Nom, de l'Ile-Adam, de Silly, etc.; celles de Sainte-Marguerite et de Château-Landon, que l'on emploie depuis plusieurs années à la construction des monuments publics de la capitale; on en a fait les bassins du Château-d'Eau, boulevard Saint-Martin, une partie de l'Arc-de-Triomphe de la barrière de l'Étoile, les parapets du Pont-Royal et la fontaine Saint-Sulpice. Ces pierres sont très-dures et prennent le poli comme le marbre; mais elles ont l'inconvénient d'avoir des moyes et des parties terreuses que l'on est obligé de nettoyer et de remplir avec beaucoup de soin, sans quoi la gelée les ferait éclater; leur hauteur de banc est de 0m,45 à 0m,55; et comme leur homogénéité permet de les poser en délit, c'est-à-dire de mettre verticalement les lits de carrière, on peut obtenir la hauteur d'assise que l'on veut.

Les carrières de roche des environs de Paris commençant à s'épuiser, on fait venir cette pierre par eau de différentes localités. Les roches de Bourgogne, et entre autres celle de Châtillon-sur-Seine, avec laquelle on a construit le socle du nouveau ministère des affaires étrangères, sont d'excellentes pierres, tout aussi dures que celles de Château-Landon, et qui n'ont pas, comme cette dernière, l'inconvénient de renfermer des parties terreuses. Leur hauteur de banc varie de 0m,50 à 0m,65.

4° Le *banc-franc* ou *pierre franche*, qui est de stratification plus récente que la roche; il est moins dur que celle-ci, et d'un grain plus fin et plus égal; on n'y rencontre jamais de parties coquilleuses, ni d'empreintes d'aucune espèce.

On emploie ordinairement cette pierre pour remplacer le liais quand

on veut économiser; son épaisseur de banc varie de 0m,30 à 0m,40, et elle atteint quelquefois 0m,60; elle provient des carrières exploitées à Montrouge, Bagneux, Châtillon, Arcueil; on en tire aussi une espèce des carrières de l'Ile-Adam, et une autre de l'abbaye du Val, même pays.

5° *La lambourde.* Cette pierre, plus tendre encore que la précédente, porte de 0m,65 à 1 mètre d'épaisseur de banc. Son grain est grossier; celle de Saint-Maur est la plus belle, la meilleure et celle qui a le plus d'épaisseur de banc. La lambourde s'emploie beaucoup à Paris pour la construction des maisons. Elle résiste bien à la gelée quand elle a perdu son eau de carrière, et elle se taille facilement. Les parements des maisons ou édifices construits avec cette pierre durcissent à l'air. A Paris, on emploie aussi le *vergelet* de Saint-Leu, qui est analogue à la lambourde, mais beaucoup meilleur. Le *Conflans* est une très belle pierre tendre que l'on extrait à Conflans-Sainte-Honorine, sur les bords de l'Oise. Enfin on fait encore usage à Paris d'une pierre tendre appelée *parmin*, que l'on extrait de l'Ile-Adam, et qui est un peu plus tendre mais d'un grain plus fin que le Saint-Leu.

508. *Troisième classe.* Elle comprend les pierres gypseuses, pierres que l'on ne peut utiliser, même comme moellons, dans les constructions, à cause de leur peu de consistance et de leur décomposition par l'humidité; aussi est-il défendu de les employer à Paris, surtout pour la construction des bâtiments; on s'en sert quelquefois pour les murs de clôture. Exposées à l'action de la chaleur, ces pierres fournissent le plâtre. Elles ne font pas effervescence avec les acides, et ne donnent aucune étincelle par le choc de l'acier.

509. *Quatrième classe.* Elle comprend les pierres scintillantes. Ces pierres, qui donnent des étincelles par le choc du briquet, ne font aucune effervescence avec les acides; elles comprennent les grès, les silex, les pierres meulières, les granits, les porphyres et les basaltes.

Les grès purs, les pierres à briquet et les pierres meulières résistent au feu le plus violent; les granits, les porphyres et les laves se vitrifient à un grand feu.

Grès. Ce sont des pierres composées de grains de sable quartzeux, de différentes figures, agglutinés ensemble par un ciment calcaire ou argileux. Elles se débitent facilement en gros cubes; il suffit, pour cela, de les étonuer en les frappant à petits coups dans une direction déterminée, à l'aide de marteaux dits épinçoirs, ou de pics tranchants.

Dans les pays où il n'y a pas de pierres calcaires, on emploie avec succès le grès comme pierre à bâtir. Dans des localités, à Paris par exemple, on emploie un grès à grain fin et serré pour le pavage des rues.

Les grès se trouvent en masses ou roches informes, que l'on nomme rognons; quelquefois cependant on les rencontre par bancs ou couches

de différentes épaisseurs. On remarque, dans les carrières de grès, que les masses sont moins dures en proportion de la profondeur où elles se trouvent, et que le grès se débite d'autant plus facilement sous des formes déterminées qu'il est plus dur. Cette espèce de pierre n'ayant pas de lit, elle se débite dans tous les sens de la grandeur que l'on veut.

Pierre à briquet ou silex. On trouve dans plusieurs pays, dans des bancs de craie, des silex en rognons assez gros pour en former des pavés, et que l'on emploie quelquefois pour construire des massifs en maçonnerie.

On appelle *cailloux*, des fragments de pierres de différentes grosseurs, plus ou moins arrondis, dont la couleur varie du brun foncé au blanc laiteux. On les trouve ordinairement dans les lits des fleuves et dans les terrains d'alluvion, à fleur du sol et quelquefois à des profondeurs considérables. Ils se présentent en grandes masses et forment de grands dépôts depuis l'époque actuelle jusqu'à celle des terrains stratifiés les plus anciens.

Meulière. Cette pierre est un composé de concrétions quartzeuses, dont le tissu est criblé de trous. On en distingue de deux espèces, l'une qui se trouve par bancs ou grandes masses, propre à faire des meules de moulins d'une seule pièce, et l'autre en roches ou morceaux isolés, épars dans les campagnes, avec laquelle on forme les meules de plusieurs pièces. Il y en a qui se débite en petits morceaux que l'on emploie comme moellons.

On trouve des carrières de la première espèce à Montmirail (Marne), à la Ferté-sous-Jouarre (Seine-et-Marne), à Menotey et Moissey (Jura), et à Chatellerault (Vienne). On en trouve de la seconde espèce dans les environs de Paris et dans le département de l'Eure.

La meulière que l'on emploie à Paris vient des environs de Corbeil et de Châtillon ; les carrières de Villeneuve-Saint-Georges et de Montgeron en fournissent également qui ont les qualités désirables.

Il arrive aussi à Paris des meulières tendres des environs de Versailles et de Buch, ainsi que de Brunoy. On les extrait en blocs de grandes dimensions, et on les taille facilement. Comme elles fournissent des parements d'une belle régularité, on les emploie souvent en remplacement de la pierre de taille ; les parements des murs de quais que l'on construit aujourd'hui à Paris sont presque tous faits, sur une épaisseur de $0^m,35$, avec des moellons de cette meulière parfaitement dressés et piqués à vive arête. Les parements en meulière dure de Corbeil et de Châtillon sont préférables à ceux de meulière tendre quand ils sont exécutés avec soin.

La meulière des environs de Corbeil se trouve à $0^m,60$ de profondeur. On l'extrait quelquefois à la surface du sol, au moment où on laboure les champs; mais ordinairement on ouvre des carrières, dont on enlève tous les morceaux propres à former des moellons.

Les moellons de meulière donnent la meilleure des maçonneries. Cela est dû à ce que le mortier s'y attache fortement en s'insinuant dans toutes les cavités, et que la meulière résiste sans aucune altération à toutes les influences atmosphériques. Le bel aspect des parements en meulière la fait souvent substituer à la pierre de taille pour cet usage; les parements des fortifications de Paris sont en meulière sur une épaisseur de $0^m,50$. Les égouts de cette ville se font en meulière, et une ordonnance de police prescrit son emploi pour la construction des fosses d'aisance.

La caillasse est une variété de pierre meulière que l'on rencontre en assise à peu près régulière; mais cette pierre, à l'opposé de la véritable meulière, ayant la surface très-lisse, le mortier y adhère très-difficilement; c'est pourquoi, dans les devis de maçonnerie en meulière, on stipule que la caillasse sera rejetée.

Granit. On désigne en général sous le nom de granit, une espèce de pierre dont la grande dureté varie avec les parties qui la constituent, et qui paraît être composée de trois matières principales, le quartz, le pétrosilex et le mica. Le granit le plus estimé est celui où ces deux premiers corps prédominent, tel est celui d'Égypte, dit *granit oriental.*

Les temples et monuments égyptiens construits de granit ont résisté, depuis plusieurs milliers d'années, à toutes les intempéries de l'air et aux dévastations des peuples qui ont successivement fait la conquête de l'Égypte.

En France, les granits les plus estimés viennent de Normandie, et proviennent des bancs les plus durs des carrières de Flamanville, près Cherbourg; de divers lieux des environs de Vire (Calvados), et surtout de Sainte-Honorine-le-Guillaume sur la rivière de l'Orne. La Bourgogne fournit des granits d'une assez bonne qualité.

Le granit se trouve dans presque toutes les contrées de la France, mais surtout en Bretagne, en Auvergne, dans les Vosges et dans les Alpes.

Quoique Paris soit éloigné des carrières de granit, on y emploie cette pierre, tirée de Normandie et de Bourgogne, à la construction des trottoirs, des bordures, des marches d'escaliers très-fréquentés, des bornes, des auges, etc. Ordinairement le granit se taille à la carrière, et il revient à 200 fr. environ le mètre cube rendu à Paris. Dans les localités où le granit est commun, on l'emploie comme pierre à bâtir; on en fait d'excellents moellons. En France, plusieurs ponts sont en granit, et en Angleterre on ne fait usage que de cette pierre pour la construction des grands ponts.

Les laves d'Auvergne ont quelque analogie avec les granits, quoique d'un grain plus fin et moins serré. Leur couleur, d'un noir très-foncé, les fait facilement reconnaître. Les meilleures proviennent des bancs les plus durs de Volvic; leur grain serré et homogène, qui les rend très-

denses, les fait préférer pour le dallage des trottoirs, quand on y fait usage de cette pierre.

Porphyre. C'est une pierre siliceuse dont la dureté, plus grande encore que celle du granit, ne permet pas de la tailler et par conséquent de l'employer comme pierre de taille; aussi ne l'utilise-t-on que comme moellons. Ses parties constituantes sont plus compactes et mieux liées que pour le granit. Les petites taches dont il est marqueté sont de quartz laiteux ou de feldspath; on y remarque aussi des points noirs et brillants. Les anciens en ont fait des colonnes, des vases, des monuments funéraires, des statues.

Il se trouve du porphyre rouge et du vert; le premier est taché de jaune dans la variété dite brocatelle d'Égypte. Le porphyre vert était appelé ophite ou serpentin, à cause de sa ressemblance avec la peau de certains serpents.

En France on rencontre le porphyre à Châteaubriand (Loire-Inférieure), dans les montagnes de l'Esterel et du Puget (Var), près de Remiremont (Vosges).

Basalte. C'est un produit volcanique d'un gris noir et quelquefois verdâtre. Son tissu est serré, son grain est fin; aussi prend-il un beau poli. Il est brillant dans ses fractures; sa dureté le rend difficile à travailler, c'est ce qui fait que dans les constructions on ne l'emploie guère qu'à faire des pavés. L'Etna paraît en être composé depuis sa base jusqu'à son sommet, il est très-rare au contraire dans le Vésuve.

Le basalte se trouve souvent par colonnes prismatiques dont la base est un polygone. On en voit sous cette forme à Saint-Tibère, près d'Agde, et au Puy-de-Dôme, près de Clermont, dont les prismes sont réguliers. On en trouve en Italie, du côté de Padoue, qu'on avait pris pour des monuments étrusques.

510. *Distinctions usitées entre les pierses de taille.* Relativement à leur emploi, on divise les pierres en deux classes: les pierres dures et les pierres tendres. Les premières ne peuvent se débiter qu'à la scie à eau et au grès, comme le marbre; les secondes se divisent à la scie à dents, comme la *lambourde*, le *vergelet*, le *Conflans*, etc.

Les bonnes qualités des pierres, tant dures que tendres, sont d'avoir le grain fin et homogène, la texture uniforme et compacte, de résister à l'humidité, à la gelée, et de ne pas éclater au feu dans le cas d'incendie.

Peu de pierres réunissent toutes ces qualités. Le premier soin, lorsqu'on a un travail de maçonnerie à exécuter, est d'examiner attentivement toutes les pierres dont on fait usage dans le pays. Pour cela on visite les carrières, afin de vérifier si leur exploitation est facile; on examine attentivement les édifices construits avec les pierres en prove-

nant, afin de voir comment elles résistent dans les diverses positions où on les a placées.

Si l'on est forcé d'exploiter de nouvelles carrières, il est bon d'en tirer des pierres dans toutes les saisons de l'année, et de vérifier si elles résistent à l'exposition à l'air, à l'eau, à la gelée et même au feu. On peut, jusqu'à un certain point, vérifier si une pierre résiste à la gelée à l'aide du procédé de M. Brard, qui consiste à imbiber la pierre de sulfate de soude et à l'exposer à l'air; la cristallisation de ce sel produit un effet analogue à celui de la congélation de l'eau et fait reconnaître les pierres que la gelée attaque le plus vivement.

Les pierres scintillantes réunissent mieux toutes les qualités d'une bonne pierre que les pierres calcaires; mais comme elles sont en général plus dures, elles sont plus difficiles à travailler. Les pierres calcaires sont moins fortes et résistent moins aux intempéries de l'air; elles sont sujettes à éclater au feu en cas d'incendie.

On remarque que, pour des pierres de même espèce, celles dont la couleur est la moins foncée sont ordinairement les plus tendres.

Les pierres dont la cassure est remplie d'aspérités et de points brillants se travaillent plus difficilement que celles qui ont la cassure lisse et le grain uniforme.

Lorsqu'on mouille une pierre, si elle absorbe l'eau promptement et qu'elle augmente de poids, elle est peu propre à résister à l'humidité.

Les pierres qui rendent un son plein lorsqu'on les frappe ont ordinairement le grain fin et la texture uniforme.

Celles qui exhalent une odeur de soufre lorsqu'on les taille ont beaucoup de consistance.

Enfin, pour des pierres de même espèce, plus elles sont pesantes, plus elles sont dures et fortes.

511. *Briques.* Les briques cuites remontent au temps de Babylone; il est difficile de fixer à quelle époque les Grecs et les Romains ont commencé à en faire usage.

Les dimensions des briques varient suivant les localités, mais le plus souvent elles ont 0^m,22 de longueur, 0^m,105 de largeur et 0^m,05 d'épaisseur. Dans tous les cas la longueur devrait être égale à deux fois la largeur plus un joint, et, autant que possible, la largeur égale à deux fois l'épaisseur plus un joint. On fait des grandes briques qui ont de 0^m,30 à 0^m,36 de longueur sur 0^m,20 à 0^m,22 de largeur et 0^m,04 à 0^m,05 d'épaisseur. On en fait des petites qui ont de 0^m,16 à 0^m,19 de longueur sur 0^m,08 à 0^m,095 de largeur, et 0^m,04 à 0^m,05 d'épaisseur.

Les *briques de Bourgogne* sont les meilleures que l'on emploie à Paris; on y fait encore une plus grande consommation des *briques de Montereau* ou *de Salins*, qui approchent beaucoup des précédentes en apparence et en qualité; les *briques*, dites *de pays*, qui se fabriquent

à Paris et dans ses environs, sont bien moins estimées encore; cependant on les emploie avec assez d'avantage dans les bâtiments, à cause de leur légèreté. Les indications suivantes feront reconnaître ces diverses espèces de briques.

Les briques de Bourgogne ont 0m,220 de longueur sur 0m,107 de largeur, et 0m,055 d'épaisseur; cette dernière dimension n'est ordinairement que de 0m,048 à 0m,050 pour les briques de Montereau. Ces deux espèces de briques sont d'un rouge très-pâle; mais les premières sont plus chargées de petites taches brunes produites par des matières vitrifiées, elles produisent parfois des étincelles sous le choc de l'acier, et elles pèsent 2250 kilog. par mille, au lieu que ce poids n'est que de 2063 kilog. pour celles de Montereau. Les briques de pays sont d'un rouge foncé; en qualité, elles approchent de celles de Montereau, seulement elles résistent mal aux chocs: elles ont encore 0m,22 de longueur, mais seulement 0m,103 de largeur, et, au plus, 0m,040 à 0m,045 d'épaisseur; le millier pèse 1935 kilog.

La *brique de Sarcelles*, du village de ce nom, situé à 12 kilomètres de Paris, est celle dont on fait le plus grand usage dans cette ville; elle ne porte que 0m,21 de longueur, sur 0m,095 de largeur et 0m,05 d'épaisseur; sa couleur est le rouge vif uniforme, sans vitrification; elle est beaucoup plus fragile et plus légère que les précédentes; le millier ne pèse que 1750 kilog.

512. *Fabrication des briques*. Lorsqu'on a des briques à faire dans un pays, on commence par soumettre à la cuisson, soit dans un four fait exprès, soit dans un four à chaux, des échantillons de chacune des terres argileuses qui se trouvent à proximité du point de fabrication. On peut rejeter sans cet essai de cuisson les terres qui contiennent des parcelles de calcaire ou de silex; la chaux que donnerait le calcaire à la cuisson, s'éteignant spontanément, détruirait les briques, et les parcelles de silex en éclatant au feu les briseraient.

Le choix de la terre étant fait, pour faciliter la manipulation, il convient d'extraire l'argile au mois de novembre et de la laisser exposée aux intempéries de l'hiver pour ne l'employer qu'au printemps suivant.

On procède alors au corroyage, qui se fait en *marchant* l'argile, la remuant et la battant à plusieurs reprises, en ayant soin d'enlever avec soin toutes les matières pierreuses ou pyriteuses, lesquelles, en servant de fondant, pourraient altérer la brique pendant la cuisson.

L'argile étant bien préparée, on y ajoute la quantité de sable ou d'alumine qui peut être nécessaire, et on remue le mélange de manière à le rendre bien homogène; puis on y verse la quantité d'eau suffisante pour l'amener à l'état de pâte ductile.

Lorsque la silice est en défaut, le sable que l'on ajoute doit être fin. Le mélange s'opère facilement en étendant la terre par couches d'une

épaisseur uniforme et en répandant dessus, en couches aussi uniformes, la quantité de sable jugée nécessaire. Si c'est l'alumine qui manque, il convient, pour faire facilement le mélange, que les deux terres soient réduites en poussière, si cela est possible, ou en pâte molle.

On a reconnu par expérience qu'en général le volume d'eau employé ne doit pas excéder la moitié de celui du mélange que l'on pétrit.

Le corroyage a la plus grande influence sur la solidité des briques, dont il augmente la densité. Deux briques, l'une préparée par les moyens ordinaires et l'autre corroyée avec le plus grand soin, toutes deux ayant été séchées et cuites dans les mêmes circonstances, la première pesait 31 grammes de moins que la seconde, et elles se sont rompues sous les charges respectives de 35 et 65 kilog. En général on a reconnu que les densités de ces briques étaient dans le rapport **82 : 86**, et les charges qu'elles supportaient dans celui **70 : 130**.

Lorsque le mélange est terminé, on façonne les briques au moyen de moules; puis on les porte au séchoir, qui est disposé sous un hangar ou en plein air. Dans ce dernier cas, on garantit les briques de l'action directe du soleil, sans quoi la dessiccation étant rapide et inégale à la partie extérieure, les briques se tourmenteraient et l'humidité intérieure ne pourrait sortir qu'en faisant gercer les briques. La dessiccation des briques étant complète, on procède à la cuisson.

513. *Cuisson des briques*. Les briques se cuisent, soit à la volée, soit dans des fours. Le premier mode consiste à disposer les briques en tas sur une aire convenablement dressée. Les tas sont formés de briques placées de champ, par assises. A la partie inférieure du tas, on laisse des vides dont la largeur, sur le sol, est égale à cinq fois l'épaisseur d'une brique; mais que l'on diminue d'assise en assise de manière à pouvoir fermer complétement les vides par la cinquième assise. Outre ces vides, qui règnent sur toute la largeur du tas et qui servent de foyers, il part, de la partie supérieure de chacun d'eux, deux ou trois vides verticaux qui servent de cheminées et facilitent la mise en feu. De plus encore, les rangs des deux premières assises sont formés de briques à peu près en contact par leurs extrémités, mais espacés latéralement tant vide que plein, de manière à recevoir une certaine quantité de charbon en morceaux de 0m,03 à 0m,04 de côté. Les briques du pourtour des cinquième et septième assises ont leur face extérieure faisant un certain angle horizontal sur les faces du tas, et on remplit encore les vides qu'elles laissent entre elles et les briques voisines avec des morceaux de charbon; on peut encore, si on le juge convenable, disposer ainsi le pourtour de quelques autres assises convenablement éloignées, afin que la température soit à peu près la même au pourtour du tas que vers le milieu. On a soin de remplir tous les

foyers de bois sec recouvert de morceaux de charbon nommé gaillette avant de poser la cinquième assise. On met le feu après avoir placé la sixième assise. Sur toute la sixième assise, excepté à l'endroit du foyer, on place une couche de houille menue, puis une nouvelle assise de briques, une couche de houille, une autre assise de briques, et ainsi de suite.

Afin de ne pas étouffer le feu, on a soin de ne placer les nouvelles assises, au-dessus de la sixième, qu'au fur et à mesure que le feu pénètre la masse.

Pour empêcher les déperditions de chaleur, et rendre celle-ci autant que possible uniforme en tous les points de la masse, on enduit le périmètre du tas avec de la terre détrempée mélangée de paille hachée. On pourrait encore utiliser la chaleur perdue en couvrant le tas de pierre à chaux.

Un tas peut être formé de vingt-quatre assises de briques et avoir cinq foyers espacés entre eux, à la partie inférieure, de quinze épaisseurs de briques. Par ce mode de cuisson, on ne peut opérer sur moins de 50000 briques à la fois, et sur plus de 200000; il faut compter sur 1/10 de briques de déchet. Les tas ont quelquefois $6^m,50$ de hauteur.

La quantité de houille brûlée est de 250 kilog. (1/3 de grosse et 2/3 de menue) par millier de briques. Un relevé fait dans le département du Nord, où la houille est à bon marché, a donné, pour le prix de revient (tous frais compris), 12 fr. par millier de briques.

Dans les pays où les briques se cuisent au bois, on construit des fours spécialement affectés à cette cuisson. Ils sont formés de quatre murs verticaux en briques, enterrés ou appuyés par des remblais en terre. Dans le pied d'un des murs sont pratiquées des petites voûtes, plus larges que celles des fours à la volée, reposant sur des pieds-droits de $0^m,60$ de hauteur. Ces voûtes, qui se prolongent sous toute l'étendue du four, sont à claire-voie, afin de laisser passer la chaleur des feux qui se font sous toutes les voûtes.

Pour la cuisson au bois on construit des grands fours qui contiennent 100000 briques, et des petits qui n'en renferment que 25000.

On alimente les foyers pendant tout le temps que dure la cuisson si on ne fait usage que de bois. Les briques se disposent dans ce four comme pour la cuisson à la volée.

On profite des murs qui entourent le four pour soutenir un toit fort élevé en tuiles; cette disposition a l'avantage de préserver les briques de la pluie et du vent, choses à redouter dans la cuisson à la volée. Tout compris, le prix de revient est plus élevé par ce procédé que par le premier.

En Suède, en Belgique, et dans quelques départements du nord de la France, au lieu de construire des fours à demeure et en maçonnerie,

on se contente de les faire en briques crues, aux abords des ateliers où les briques doivent être employées.

Quand on cuit les briques au moyen de la tourbe, on établit les fours sous de vastes hangars, et on les construit de la même manière que ceux chauffés au bois; les foyers s'étendent sous toute la profondeur de la base du four.

Dans les localités où le charbon manque, on peut faire usage du four à deux compartiments (fig. 15, planche II), construit à l'arsenal de Brest, pour lequel le tableau suivant donne une idée de la conduite du feu pendant la cuisson de la brique.

Ce tableau indique le nombre des fagots brûlés pendant chaque heure de chaque quart. Le premier quart comprend les six premières heures de cuisson; le deuxième quart, les six heures suivantes; le troisième, les six autres, et ainsi de suite.

HEURES de chaque quart.	Nombres de fagots brûlés dans le compartiment							
	inférieur.							supérieur.
	1er quart.	2e quart.	3e quart.	4e quart.	5e quart.	6e quart.	7e quart.	8e quart.
1	10	23	31	26	31	30	32	16
2	13	24	28	28	28	32	»	18
3	17	26	27	30	30	28	»	17
4	16	28	29	32	27	30	»	20
5	19	27	31	29	29	29	»	»
6	20	29	27	29	27	30	»	»
Pour chaque quart. . . .	95	157	173	174	172	179	32	71

On brûle donc 1053 fagots pesant chacun $8^{k},9$, ce qui fait un poids total de $9371^{k},70$.

Contenu du four. . .	Compartiment inférieur. . . .	6200 briques.
	Compartiment supérieur. . . .	2800
	Total.	9000

Poids du bois brûlé par millier de briques, 1041 kilog.

Pour charger et décharger le compartiment inférieur, on enlève la maçonnerie A, qui ferme complétement le cendrier du compartiment supérieur pendant toute la durée de la cuisson; on retire également la plaque de fonte D qui sépare l'ouverture du foyer de celle du cendrier.

L'ouverture *a* du cendrier inférieur, comme celle du cendrier supérieur, a $0^{m},40$ de côté, et un registre la laisse seulement ouverte au tiers pendant les 7 premiers quarts, et la ferme presque complétement pendant le 8e quart.

BB ouvertures de 0m,40 de côté, facilitant le chargement et le déchargement des compartiments, et que l'on tient fermées par des doubles cloisons en briques pendant la cuisson ;
CC voûtes à claire-voie supportant les briques dans chaque compartiment ;
DD grilles dont les sections sont le tiers de celles des chargements à la base. Les barreaux sont en fer de 0m,03 de largeur, et ils sont espacés de 0m,01 entre eux.

On a trouvé par expérience que l'on obtenait le maximum d'effet du combustible, quand le vide laissé entre les briques à cuire était le tiers du vide total. On place les briques de champ, comme dans la cuisson à la volée, et le chargement se fait complétement avant de mettre en feu. En disposant les briques, on a soin de ménager des vides plus grands vers les parois du four que dans le milieu, afin que la chaleur se propage uniformément dans toute la masse. Dans les parties rétrécies, on a soin aussi de laisser des vides plus grands.

Les portes des foyers sont formées d'un cadre en fer, entre les parois duquel on fait une murette en briques. Au milieu de chaque porte se trouve une petite ouverture qui permet de voir ce qui se passe dans le foyer, sans être obligé d'ouvrir la porte ; cette ouverture se ferme par un tampon amovible en terre.

Fig. 16 et 17, pl. II. Coupes en élévation et en plan d'un four employé à Paris pour cuire des pots à cloisons, des briques pour tuyaux de cheminées et des tuyaux entiers.

CCC petits canaux de communication du four avec la cheminée, ayant 0m,085 de largeur sur 0m,16 de hauteur; ils sont éloignés de 0m,12 environ. La cheminée a 0m,25 à 0m,30 de largeur à la base, mais elle devient carrée à une certaine hauteur ;
D porte par laquelle on introduit et on retire la marchandise ; on la ferme pendant la cuisson par une murette en briques ;
E ouverture par laquelle se dégage l'air quand on veut défourner; cet orifice, qui ouvre dans l'étuve où sèchent les poteries, est fermé pendant la cuisson.

La partie qui couvre le foyer est sphérique, le reste est cylindrique. On brûle du bois, et il paraît que le feu dure de douze à quinze heures par fournée (consulter l'article *Tuiles*).

514. *Couleurs et indices de bonne qualité des briques.* Quand l'argile employée à la fabrication des briques est ferrugineuse, à la cuisson les briques deviennent rose tendre, passent au rouge plus ou moins vif, au rouge pourpre, et enfin au noir, couleur et cassure laitier. Elles augmentent un peu de volume jusqu'au terme de demi-cuisson, et au delà elles éprouvent un retrait qui va toujours croissant jusqu'à leur vitrification si le feu est assez vif.

Quand l'argile ne contient l'oxyde de fer qu'en faible quantité, mais qu'elle contient du carbonate de chaux, les briques restent d'un blanc sale pendant toute la cuisson ; elles sont encore susceptibles de se vitri-

fier, la chaux, comme l'oxyde de fer, étant attaquée par la silice à une haute température.

Si l'argile ne contient ni oxyde de fer ni chaux, elle fournit des briques infusibles, dites *briques réfractaires*, que l'on emploie pour la construction de toutes les parties de fourneaux susceptibles d'être exposées à une température très-élevée.

Les indices de mauvaise qualité des briques sont : avoir une couleur rouge jaunâtre, surtout rendre un son sourd sous le choc, s'émietter entre les doigts, posséder un grain mollasse et grenu, absorber l'eau avec rapidité et se rompre facilement. Une bonne brique, au contraire, rend un son clair par la percussion, elle est dure, son grain est fin et serré dans la cassure ; elle est ordinairement d'un rouge brun foncé, et quelquefois elle présente à la surface des parties vitrifiées. Il ne faut pas cependant toujours se fier à cette dernière apparence, qui provient souvent d'un commencement de vitrification due au degré de cuisson seul, quoique l'argile soit impure et mal préparée.

Il arrive quelquefois que pour donner un plus beau coup d'œil aux briques, le fabricant sème sur la plate-forme du séchoir un peu de sable et de mâchefer. Ces matières s'attachent à la surface des briques encore humides, et un commencement de vitrification, au moment de la cuisson, donne une belle apparence aux briques, qui peuvent cependant être de mauvaise qualité.

515. *Briques crues.* L'usage de ces briques, dont Vitruve décrit la fabrication, remonte à la plus haute antiquité ; on en trouve dans la plupart des monuments grecs et romains ; il existe encore en Égypte et en Asie des édifices bâtis avec ces briques, à des époques bien antérieures à l'ère vulgaire.

Malgré l'humidité du climat, il y a des localités en France où les briques crues sont d'un usage très-répandu ; dans les faubourgs de Reims, par exemple, on voit des maisons qui en sont parfaitement construites. Ces briques ont $0^m,30$ de longueur, sur $0^m,14$ de largeur et $0^m,07$ ou $0^m,08$ d'épaisseur ; on les fabrique, comme les briques ordinaires, dans des moules réguliers ; les meilleures sont d'argile rouge ou blanche mêlée de sable ; on en fait aussi avec la boue qui se forme sur les routes, laquelle est composée d'argile, de craie et de silex écrasé. Le moment le plus favorable pour leur fabrication est le printemps et l'automne, saisons pendant lesquelles la dessiccation se fait plus lentement et plus également ; elles ne s'emploient qu'après qu'elles sont arrivées, par leur exposition à l'air et au soleil, à une dessiccation complète, sans laquelle la gelée, en faisant gonfler l'eau, amènerait leur destruction. Les anciens ne les employaient que deux ans après leur fabrication ; alors ils étaient sûrs qu'elles avaient acquis le degré de solidité dont elles sont susceptibles. Ces briques sont d'un mauvais usage à l'humidité lorsqu'elles ne sont pas recouvertes ; dans les pays où on

les emploie communément, on a soin de recouvrir les maçonneries de nombreuses couches de peinture à la chaux, ou, si l'on veut faire mieux, on applique dessus un enduit de chaux, d'argile et de boue, lequel est tout à fait imperméable à l'eau, et leur assure une plus grande durée.

516. *Briques creuses. Poteries. Carreaux.* A Paris on fait usage, pour la construction des tuyaux de cheminées dans l'épaisseur des murs, de briques portant l'empreinte d'un et quelquefois de deux tuyaux voisins, en même temps que leurs dimensions correspondent aux épaisseurs des murs. Ces briques ont été imaginées par M. Gourlier, dont elles ont pris le nom.

Depuis quelque temps, on a fabriqué des briques creuses assez légères, en pratiquant dans l'intérieur de parallélipipèdes semblables aux briques ordinaires des petits trous allant d'une extrémité de la brique à l'autre.

Dans le bâtiment on désigne sous le nom de *poteries*, les *boisseaux* en terre cuite pour tuyaux de cheminées, les *pots* pour *ventouses* à courant d'air, les *mitres* en terre, etc. Ces divers objets sont en grès ou en terre cuite préparée à peu près de la même manière que celle employée à la fabrication des briques.

Depuis quelques années, pour établir des voûtes et des cloisons très-légères, on fait usage de poteries creuses de formes et dimensions diverses; les unes ont la forme d'un pot à fleurs fermé aux deux extrémités, et dont les dimensions habituelles sont 0m,10 de diamètre moyen sur 0m,15 de hauteur; les autres sont des cylindres de 0m,05 de hauteur seulement sur 0m,17 de diamètre. Ces poteries se fabriquent toutes à peu près de la même manière, au moyen d'un tour de potier, avec de la terre préparée comme pour la fabrication des tuiles, des briques et des poteries grossières. Dans le midi de la France, on fabrique encore, pour voûtes légères, des prismes creux en terre cuite qui ont 0m,14 de hauteur, des bases hexagonales inscrites dans des cercles de 0m,17 de diamètre, et dont le vide est cylindrique.

Carreaux. On nomme ainsi des petites dalles employées au pavage des chambres. On en fait en pierre calcaire, souvent à l'état de marbre; on leur donne les formes triangulaire, carrée, hexagonale, octogonale, que l'on emploie séparément ou combinées entre elles.

Les carreaux les plus employés sont hexagonaux et en terre cuite préparée comme pour les briques (512). On en fait de deux grandeurs, les uns, employés au pavage des chambres, ont 0m,027 d'épaisseur et sont inscrits dans un cercle de 0m,20 de diamètre; les autres sont inscrits dans un cercle de 0m,14 de diamètre; il en faut respectivement 40 et 80 pour couvrir un mètre de surface, et le poids du mille varie de 800 à 900, et de 350 à 400 kilog. Ceux que l'on emploie à Paris sont fabriqués en Bourgogne, à Massy, à Paris et dans ses environs. Les pre-

miers sont les meilleurs, surtout pour les lieux humides; ceux de Massy viennent après, seulement ils sont moins bien moulés que ceux de Paris, que l'on emploie ordinairement.

517. *Carreaux en plâtre.* Avec le mortier de plâtre et des plâtras de peu d'épaisseur, on fait des carreaux qui servent à construire des cloisons d'appartement; ils ont ordinairement 0m,48 de longueur, sur 0m,32 de largeur, et de 0m,055 jusqu'à 0m,16 d'épaisseur; l'épaisseur la plus habituelle est de 0m,08, c'est celle qui est la plus conforme à l'équarrissage ordinaire des huisseries et des poteaux de remplissage des cloisons.

Depuis quelques années, on fait à Paris des carreaux creux en plâtre, ayant à peu près les mêmes dimensions que les précédents; ils ont l'avantage d'être très-légers, et surtout d'assourdir les appartements divisés par les cloisons qui en sont construites.

518. *Terre employée comme mortier.* On emploie quelquefois l'argile pour relier les moellons et surtout les briques. On en fait un usage exclusif pour la construction des foyers et en général de toutes les constructions susceptibles d'être exposées à une température élevée; dans ce cas, on y mélange une plus forte quantité de sable, afin que la haute température ne produise pas un retrait trop considérable.

519. *Plâtre, sa cuisson, son emploi.* (*Art.* nos 61 et suivants). Le sulfate de chaux, que l'on désigne sous le nom de *gypse*, fournit le plâtre quand on lui fait perdre son eau de cristallisation en l'exposant à une certaine température.

On a reconnu que les grandes couches de pierre à plâtre surmontent souvent des bancs de pierre calcaire sans être jamais surmontées; d'où on est porté à conclure qu'elles sont d'une formation plus récente.

Le sulfate de chaux pur ne donne pas d'étincelle sous le choc de l'acier et ne fait pas effervescence avec les acides.

Les fours le plus employés à la cuisson des pierres à plâtre se composent d'un mur de 4m,50 formant le derrière du four, et de deux autres construits perpendiculairement au premier, et destinés à supporter un comble à deux égouts, dont les tuiles sont posées à claire-voie, afin de laisser passer la fumée et la vapeur.

Sous cette espèce de hangar, dont le devant reste entièrement ouvert, on établit, parallèlement aux murs de côté, plusieurs petites galeries voûtées de 0m,65 environ de hauteur sur 0m,50 de largeur, séparées par des piliers de même largeur. Ces galeries se font avec les plus gros morceaux de pierre à plâtre, en ayant soin de laisser des petits vides dans les voûtes pour faciliter le passage de la fumée. On place alors de la pierre à plâtre sur les voûtes, jusqu'à la hauteur 4m,50 des murs du four, en terminant par une couche d'éclats provenant des résidus de l'extraction.

On remplit alors les galeries de fagots, de bourrées ou de bois fendu; on y met le feu, que l'on active graduellement au commencement; puis on entretient une chaleur régulière jusqu'à la fin de l'opération. La cuisson étant complète, on recouvre la masse d'une couche de poussier de pierre à plâtre et on laisse refroidir.

La quantité de bois brûlée dans ces fours varie évidemment suivant l'essence et l'état de dessiccation du bois.

TABLEAU des résultats moyens obtenus pour trois fours différents contenant chacun 60 mètres cubes de plâtre.

BOIS.	FAGOTS OU BOURRÉES.		COMBUSTIBLE BRULÉ	
	Nombre.	Poids de chaque.	en totalité.	par mètre cube.
Chêne.	550	23k.00	12650 k.	210k.83
Bouleau et châtaignier mélangés.	700	16 .50	11550	192 .50
Chêne et charme mélangés. . . .	900	9 .00	8100	135 .00

La durée de la cuisson du plâtre varie de 10 à 15 heures; elle dépend de la quantité de pierre mise au four, de l'état de dessiccation du bois et de l'état de l'atmosphère. L'habitude indique assez le point auquel il faut arrêter le feu, et ce moment est très-important à saisir, car la bonne qualité du plâtre dépend en grande partie de sa cuisson à un degré précis, en deçà et au delà duquel on n'obtient qu'un plâtre très-inférieur.

La cuisson du sulfate de chaux s'opère aussi dans des fours analogues à ceux employés pour cuire la brique au moyen du bois (513), mais à un seul compartiment. La figure 18, planche 11, représente un de ces fours.

TABLEAU du nombre des fagots brûlés pour la cuisson d'une fournée de 8 mètres cubes de plâtre, pendant chaque heure de cuisson.

Heures. . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fagots. . . .	13	20	28	27	26	27	28	26	28	30

Total : 253 fagots, dont le poids est $8^k,7 \times 253 = 2201$ kilog.; ce qui fait 275 kilog. par mètre cube de plâtre.

Pour cuire le plâtre, on modère le feu en commençant, et on l'augmente graduellement jusqu'à ce que le sulfate ait perdu toute son eau de cristallisation. Son poids a alors diminué de 1/4 environ.

Quand le plâtre est convenablement cuit, l'ouvrier qui l'emploie sent, en le maniant, qu'il est doux et qu'il s'attache aux doigts; c'est à ces indices que l'on peut surtout reconnaître le bon plâtre; les en-

duits qu'il forme sont d'un grain fin et agréable à l'œil. Lorsqu'il n'est pas assez cuit, il est aride, n'absorbe l'eau qu'imparfaitement et ne forme pas un corps assez solide. Quand il est trop cuit, il refuse l'eau parce qu'il est en partie vitrifié; il est devenu maigre, graveleux; il s'égrène au lieu de former un corps solide quand il est employé.

Les plâtres de mauvaise qualité sont en général d'une couleur jaunâtre; ils sont rudes au toucher comme la pierre calcaire pulvérisée; ils sont longs à prendre; ils donnent des enduits qui ne résonnent pas sous la truelle bretée; ils se rayent profondément et se gercent facilement.

Le plâtre exposé à l'air absorbe l'humidité et perd ses qualités, aussi doit-on l'utiliser le plus tôt possible après sa cuisson. Si on le tire de loin, il convient, pour les mêmes raisons, de faire venir la pierre, que l'on cuit au moment d'employer le plâtre. Lorsque l'on veut conserver le plâtre, il faut apporter le plus grand soin à le préserver du contact de l'air.

Il existe des plâtres dont la prise serait tellement prompte, immédiatement après la cuisson, que l'ouvrier n'aurait pas le temps de l'employer; c'est ce qui fait que quelquefois des compagnons intelligents, pour tirer le meilleur parti possible de leur plâtre, le laissent reposer 4 ou 5 jours avant de l'employer.

Le plâtre réduit en poudre, soit en le battant, soit au moyen de meules ou de cylindres, n'a pas besoin du concours d'autres matières pour former un corps d'une dureté moyenne; il suffit d'y mélanger une certaine quantité d'eau, qui produit une cristallisation confuse et fait reprendre au plâtre à peu près sa solidité primitive.

Le plâtre jouit de la propriété d'adhérer au bois et à la pierre; mais il faut éviter de l'employer dans les lieux humides; au sec il se conserve parfaitement bien.

Pour gâcher le plâtre, il faut à peu près autant d'eau que de plâtre. Cependant on varie cette quantité d'eau suivant l'usage auquel on destine le plâtre; ainsi, on la prend plus petite, c'est-à-dire qu'on *gâche serré*, quand on a besoin que le plâtre conserve toute sa force; mais alors il faut l'employer sitôt qu'il a été gâché; on met plus d'eau, c'est-à-dire qu'on *gâche clair*, quand l'emploi du plâtre exige plus de temps; enfin on gâche avec plus d'eau encore, c'est-à-dire qu'on forme ce qu'on appelle un *coulis*, quand le plâtre doit être employé pour boucher des trous où la truelle ne peut atteindre.

A Paris, pour l'emploi ordinaire du plâtre, la quantité d'eau à mettre dans l'auge, pour un voyage de garçon, est d'environ deux seaux; pour *deux truellées*, un seau et demi; *une truellée*, un seau; *une demi-truellée*, un demi-seau, et *une poignée*, un quart de seau. Quand le maçon crie de lui gâcher *gros comme un œuf*, il demande à peu près la moitié d'une poignée.

Une précaution à prendre quand on gâche le plâtre, c'est de mettre d'abord la quantité d'eau nécessaire dans l'auge, et d'y semer ensuite uniformément le plâtre à l'aide de la truelle. Le garçon apporte le tout au maçon, qui le remue avec une truelle en cuivre qu'il agite dans tous les sens, en cassant les mottes avec la main gauche. Si le plâtre gâché est un peu clair pour être employé, le maçon le laisse un peu *couder*, c'est-à-dire prendre une légère consistance; alors il l'emploie avec rapidité, car une fois que le plâtre a commencé à couder, il n'est pas longtemps à prendre.

Un mètre cube de plâtre en pondre produit environ $1^{m},18$ de mortier, et le gonflement, après 24 heures d'emploi, est environ 1 pour 100, dont la moitié était produite après la première heure de mise en œuvre.

Sous le rapport de l'emploi du plâtre dans les constructions, on en distingue de trois sortes :

1° Le *plâtre au panier*. C'est celui qui est à l'état dans lequel le fabricant le livre à l'entrepreneur; on l'emploie pour faire les aires de plancher, hourder les murs et pans de bois, et faire les crépis. On appelle encore ainsi le plâtre tamisé dans un panier d'osier; il est plus fin que le précédent, et il sert ordinairement à faire les crépis d'une faible *charge* (épaisseur);

2° Le *plâtre au sas*. C'est celui qui est passé dans un tamis de crin; il sert ordinairement à faire les enduits et les moulures;

3° Le *plâtre au tamis de soie*. Il est utilisé pour faire les beaux enduits et moulures qui doivent recevoir de la peinture.

On distingue encore les *mouchettes* et la *fleur de plâtre*. Les mouchettes sont les résidus provenant du passage du plâtre au sas. On les utilise ordinairement en les mêlant avec de l'autre plâtre pour faire de gros ouvrages.

La fleur de plâtre est le plâtre qui se trouve en poussière plus fine encore que celui passé au tamis de soie. On l'obtient en faisant sauter du plâtre sur une pelle, à laquelle la fleur s'attache assez facilement; c'est de ce mode de préparation que lui vient le nom de *plâtre à la pelle*, que lui donnent les maçons.

Les plâtres employés à Paris sont tirés des carrières de Montmartre, Pantin, Ménilmontant, Belleville, Charonne et Montreuil. Celui de Pantin est le plus estimé.

520. *Chaux*. Le carbonate de chaux, à une température suffisante, perd son acide carbonique et fournit la chaux.

Les pierres calcaires ou *pierres à chaux* font effervescence avec l'acide azotique et se laissent pour la plupart profondément rayer par une pointe de fer.

Les propriétés générales des chaux, lorsqu'elles ont été réduites en pâte, sont de perdre leur eau par l'évaporation, d'absorber l'acide carbonique de l'atmosphère et de former un silicate de chaux en se combinant avec la silice du sable auquel on les a mélangées. De ces effets combinés, il résulte la formation d'un corps qui durcit en adhérant aux matériaux de construction et fournit des masses solides.

Les chaux que l'on emploie à Paris et dans ses environs proviennent

de Champigny, Sèvres, Meudon, Marly, Essonnes, Melun, Senlis et Rambouillet; ces deux dernières sont très-estimées. Autour de Paris il existe aussi des fabriques considérables de chaux, dans lesquelles on fait des chaux hydrauliques naturelles et artificielles; les produits de celles de la Gare, de Vaugirard, des Moulineaux et des buttes Chaumont ne laissent rien à désirer quand ils ont été préparés avec les soins convenables. On emploie aussi pour les grands travaux de construction les chaux hydrauliques de Tournay, de Cassel, de Metz, etc.

Si l'on considère la chaux sous le rapport de la quantité d'eau nécessaire pour la réduire en pâte, on distingue:

1° La *chaux grasse*, qui est celle dont le volume augmente d'au moins 1/4 et souvent de deux fois 1/2 son volume primitif par l'extinction. Cette chaux est la plus profitable aux entrepreneurs, attendu qu'elle se combine avec une très-grande quantité de sable. On l'emploie pour la confection des mortiers de maçonneries ordinaires; mais il faut s'en abstenir pour tous les travaux hydrauliques ou souterrains, attendu qu'elle n'y durcit que très-imparfaitement;

2° La *chaux maigre*, qui est celle dont le volume reste à peu près constant à l'extinction. Il y a de la chaux maigre qui est hydraulique, et de l'autre qui ne l'est pas. Elle fournit moins de mortier que la précédente. Elle durcit assez vite à l'air. A défaut d'autres, on l'emploie aux mêmes usages que la précédente quand elle ne jouit pas de la propriété hydraulique.

Si l'on considère la chaux sous le rapport de la dureté que sa pâte peut acquérir lorsqu'elle est immergée sous l'eau, on distingue:

1° La *chaux non hydraulique*, qui est celle qui ne durcit pas dans l'eau; elle comprend les deux variétés précédentes;

2° La *chaux hydraulique*, qui est celle qui durcit dans l'eau; cette chaux est plus ou moins maigre, c'est-à-dire qu'elle foisonne peu à l'extinction;

3° Il y a encore la chaux dite *chaux-ciment* ou *ciment romain*; c'est celle qui n'est pas susceptible de fuser (529).

L'analyse a fait reconnaître, comme le confirme le tableau suivant:

1° Que le carbonate qui fournissait la chaux grasse contenait moins de 1/10 de matières étrangères;

2° Qu'au-dessus de 1/10, le carbonate fournissait une chaux qui était d'autant plus maigre que cette proportion de matières étrangères était plus grande;

3° Que la propriété hydraulique était due à la formation, au feu, d'un silicate de chaux; c'est-à-dire que la silice jouait un rôle essentiel dans cette combinaison, mais que la combinaison n'avait lieu qu'autant que la silice se trouvait en gelée ou réduite à un état de ténuité extrême dans son mélange avec le carbonate de chaux.

TABLEAU de la composition de quelques pierres à chaux, d'après les analyses de M. Berthier.

Chaux grasse de Château-Landon. . .	96,40	Chaux pure.
	1,80	Magnésie.
	1.80	Argile (silice et alumine).

Chaux maigre non hydraulique de Coulommiers.	78,00 Chaux pure. 20,00 Magnésie. 2,00 Argile (silice et alumine).
Chaux moyennement hydraulique de Saint-Germain.	89,00 Chaux pure. 1,00 Magnésie. 10,00 Argile (silice et alumine).
Chaux très-hydraulique de Senonches.	70,00 Chaux pure. 1,00 Magnésie. 29,00 Silice.

A ce Tableau on peut ajouter :

Chaux maigre non hydraulique de Brest.	82,30 Chaux pure. 10,00 Oxyde de fer. 7,70 Argile.

Ces analyses font voir que la magnésie et l'oxyde de fer rendent la chaux maigre non hydraulique, et que la silice pure ou mélangée d'alumine la rend hydraulique.

M. Berthier, en opérant par synthèse, a obtenu, pour la même composition, des chaux jouissant des mêmes propriétés que celles du tableau, et il a reconnu de plus :

1° Que la silice en gelée, calcinée avec de la chaux pure, donnait un produit hydraulique ;
2° Que l'alumine, la magnésie, l'oxyde de fer et l'oxyde de manganèse, calcinés un à un avec de la chaux pure, donnaient une chaux maigre ;
3° Que l'alumine et la magnésie, mêlées avec la silice, exaltaient la propriété hydraulique ; mais que les proportions les plus convenables pour ce mélange étaient une partie de silice pour une partie d'alumine ou une partie de magnésie.

Avant ces analyses, M. Vicat avait trouvé que si on faisait cuire dans un four à chaux un mélange d'argile et de chaux éteinte ou de carbonate de chaux réduit en pâte, on obtenait de la chaux hydraulique, quand la proportion d'argile était d'au moins 10 pour 90 de chaux, et que la chaux était d'autant plus hydraulique que la proportion d'argile était plus considérable ; mais que si cette proportion d'argile dépassait 34 pour 66 de chaux, le composé ne fusait plus.

Depuis que cette théorie a été clairement établie, on a fait, par la synthèse, des essais sur tous les composés qu'il était possible d'obtenir en faisant varier les proportions de chaux et d'argile. Ces essais ont conduit à ranger les chaux sous les dénominations suivantes :

	Argile.	Chaux.
Chaux hydrauliques, celles qui contiennent.	0,10	0,90
	0,20	0,80
	0,30	0,70
Limite.	0,34	0,66
Chaux-ciments, celles qui contiennent.	0,40	0,60
	0,50	0,50
	0,60	0,40
Limite.	0,61	0,39

Ciments hydrauliques ou *pouzzolanes*, celles qui contiennent { 0,70 0,30 / 0,80 0,20 / 0,90 0,10 }

Ciments ordinaires, celles qui contiennent plus de 0,90 d'argile.

Les différentes espèces de chaux que nous venons d'énumérer se distinguent par les propriétés suivantes :

1° La *chaux grasse*, mise en contact avec l'eau, produit le même bruit qu'un fer rouge que l'on tremperait dans cette eau ; elle dégage de la chaleur, au point de mettre l'eau en ébullition et de dégager des vapeurs légèrement caustiques ; elle augmente beaucoup de volume, foisonne et se réduit en une pâte blanche, laquelle, immergée dans une masse d'eau suffisante, s'y dissout complétement. La chaux pure se dissout dans cinq à six cents fois son poids d'eau ;

2° La *chaux maigre* non hydraulique fuse à l'extinction, mais plus lentement et avec un moindre dégagement de chaleur que la chaux grasse ; elle augmente moins de volume et sa pâte ne durcit pas non plus sous l'eau ;

3° La *chaux hydraulique* se comporte à peu près comme la précédente à l'extinction ; mais sa pâte, mise sous l'eau, fait corps dans un temps plus ou moins long ;

4° La *chaux-ciment* ne fuse pas, mais, réduite en poudre, puis en pâte, elle prend corps très-rapidement ;

5° Le *ciment hydraulique* ou *pouzzolane* est trop maigre pour fuser et former pâte ; mais, réduit en poudre et mélangé avec de la chaux grasse, il donne une matière qui jouit de la propriété de durcir promptement sous l'eau ;

6° Le *ciment ordinaire* est inerte quand l'argile qui entre dans sa composition ne contient pas de chaux, et il acquiert des qualités légèrement hydrauliques à mesure que la proportion de chaux augmente.

Les chaux maigres non hydrauliques, c'est-à-dire les chaux ou carbonates de chaux dans lesquels il entre une quantité notable d'oxyde de fer ou de manganèse, ne sont pas propres à cette transformation en chaux hydrauliques par le concours seul de l'argile et du feu ; on est obligé, pour leur donner cette qualité, d'employer, non pas de l'argile, mais de la pouzzolane ou ciment hydraulique obtenu par la calcination de l'argile calcaire.

Manière dont se comportent les différentes sortes de chaux, lorsque, réduites en pâte, elles sont immergées sous l'eau, seules, ou mélangées de sable.

1° La *chaux grasse*, dans un volume d'eau indéfini, se combine rapidement avec un poids d'eau à peu près égal aux 0,22 du sien ; retirée et exposée à l'air, elle fuse avec dégagement de chaleur, en se réduisant en poudre impalpable. La matière obtenue, appelée *hydrate de chaux*, peut encore absorber une grande quantité d'eau, mais sans qu'il y ait ni combinaison ni dégagement de chaleur. Cet excès d'eau, qui donne naissance à une pâte plus ou moins ferme, peut se dégager en assez grande quantité par le rebattage, pour qu'il soit inutile d'en ajouter de nouvelle pour la fabrication du mortier.

Les mortiers de cette chaux restent mous, comme le fait la chaux seule, quand on les prive du contact de l'air, ou plutôt de l'acide carbonique ; la solidification de la chaux étant due à l'absorption de cet acide, on en conclut que la chaux est sans effet sur le sable quartzeux.

La chaux continue d'absorber l'acide carbonique jusqu'à ce que l'acide soit

à la base dans le rapport approché de 43 à 57, comme dans les sous-carbonates de chaux naturels, et de plus, comme l'eau de l'hydrate n'a pas été rejetée par cette solidification, on voit que l'on obtient un hydrocarbonate de chaux.

D'après M. Vicat, 100 parties de chaux grasse absorbent, en se solidifiant, 74 parties d'acide carbonique, et en retiennent 17 d'eau.

2° La *chaux hydraulique*, éteinte à la manière ordinaire, solidifie, comme la chaux grasse, une certaine quantité d'eau, et forme, avec une addition d'eau, une pâte plus ou moins ferme, laquelle, exposée à l'air, se solidifie en absorbant une moindre quantité d'acide carbonique que la chaux grasse, et en retenant également une certaine portion d'eau. D'après M. Vicat, 100 parties d'une chaux hydraulique contenant 1/5 de son poids d'argile absorbent, en se solidifiant, 54 parties d'acide carbonique et retiennent 15 parties d'eau; ainsi ce produit, composé de 100 parties de chaux, 25 d'argile, 67,5 d'acide carbonique et 18,7 d'eau, est encore un hydrocarbonate de chaux dans lequel l'argile paraît être en dehors de la combinaison.

Quoique 65 parties de silice combinées avec la chaux, par la calcination, ne rendent réellement insoluble dans l'eau que 35 parties de chaux; cependant, pour qu'une chaux soit hydraulique, c'est-à-dire pour qu'étant réduite en pâte elle se solidifie sous l'eau, et par conséquent sans le concours de l'acide carbonique, il suffit qu'elle soit combinée, par la calcination, à 6 ou 7 centièmes de silice: une attraction moléculaire du silicate de chaux formé sur la chaux libre peut seule expliquer comment cette dernière devient insoluble.

La combinaison de la silice avec la chaux est la seule inattaquable par l'eau; l'alumine et quelques autres oxydes ne font qu'exalter les propriétés hydrauliques, sans pouvoir, seuls, communiquer ces propriétés à la chaux.

Les chaux hydrauliques contenant la limite d'argile, c'est-à-dire 34 d'argile pour 66 de chaux, donnent des mortiers qui durcissent rapidement; mais il faut que toutes les molécules de chaux soient attaquées par l'eau au moment de l'extinction; car s'il en reste de libres, elles fusent seulement dans la masse, et en désagrégent toutes les parties, qui ne peuvent plus ensuite prendre aucune consistance. Il conviendrait, pour éviter cet inconvénient, qui s'est déjà présenté, de pulvériser ces chaux limites, comme on le fait pour les chaux-ciments; par là, toutes les molécules de chaux seraient mises à peu près dans les mêmes circonstances pour leur extinction, et l'inconvénient signalé ne serait pas à redouter.

Un moyen de reconnaître le degré d'hydraulicité des chaux consiste à les placer dans un verre immédiatement après leur extinction. Si elles sont de bonne qualité, elles doivent avoir fait prise huit ou dix jours après leur immersion, de manière à supporter, sans dépression, une aiguille d'acier de 2,2 millimètres de diamètre, limée carrément à son extrémité et chargée d'un poids de 0,3 de kilog. Les chaux hydrauliques indiquées au tableau du n° 525 ont toutes satisfait à cette condition, après des durées d'immersion de sept à quatorze jours.

3° *Chaux-ciments.* Par la carbonisation des carbonates de chaux dans lesquels les proportions d'argile varient de 34 à 61 pour 66 à 39 de chaux, il se forme un silicate de chaux plus ou moins abondant, et la chaux qui a pu rester libre ne peut plus fuser, de sorte que l'eau est sans action sur toute la masse de cette chaux quand elle sort du four; mais, réduite en poudre et mouillée d'une quantité d'eau suffisante pour en faire une pâte plus ou moins consistante, il se produit une cristallisation confuse, et la pâte prend corps sous l'eau et d'autant plus rapidement que le silicate est plus abondant, si toutefois il n'est pas en quantité suffisante pour nuire à l'action réciproque des molécules les unes sur les autres.

La prise est d'autant plus rapide que la chaux n'a pas été exposée à l'air depuis sa sortie du four, et, à ce moment, si on la broie et si on l'utilise immédiatement, la prise est quelquefois si rapide qu'on n'a pas le temps de l'employer (529).

4° Les *ciments hydrauliques* ou *pouzzolanes* étant composés de 61 à 90 d'argile pour 39 à 10 de chaux, ils renferment, après la cuisson, du silicate de chaux, sans qu'il y ait assez de chaux libre pour que le résidu de la calcination, réduit en poudre, fasse pâte, et l'eau ne produit aucun effet sur cette poudre, que l'on ne peut utiliser qu'en y mélangeant une certaine proportion de chaux grasse. Le silicate se trouve, suivant les proportions de chaux qu'il contient, dans les mêmes conditions que dans une chaux plus ou moins hydraulique, ou que dans la chaux-ciment.

5° *Ciments de briques ou de tuiles.* Ces matériaux contenant généralement moins de 1/10 de chaux, ils sont encore en dehors des pouzzolanes; mais cependant celle qu'ils peuvent contenir est combinée avec la silice, et on remarque, quand l'argile n'a pas été trop cuite, que de la chaux grasse, combinée avec ces matières pulvérisées, donne un mortier qui a un léger degré d'hydraulicité.

Comme la pulvérisation de la brique ou de la tuile est coûteuse, il vaut mieux, au lieu de faire usage de ces matières, fabriquer des pouzzolanes énergiques, dont une légère quantité, mélangée au mortier ordinaire de chaux grasse, suffit pour faire un très-bon mortier hydraulique. Ce n'est qu'à défaut de toute autre matière qu'on doit avoir recours à l'emploi du ciment de briques ou de tuiles.

D'après M. Vicat, de l'argile, après une première cuite, donnant à la combinaison avec la chaux une énergie représentée par 1, bis-cuite, cette énergie est représentée par 0,30, et demi-vitrifiée par 0,19; on voit donc que c'est une erreur de croire que la brique la plus cuite est la plus convenable pour la fabrication des mortiers.

521. *Recherches et moyens de se procurer de la chaux hydraulique.* La chaux hydraulique est fournie par la simple cuisson du calcaire naturel qui contient tous les éléments de cette chaux (520); mais, dans les localités où ce calcaire ne se trouve pas, on fabrique la chaux hydraulique en faisant un mélange intime de tous les éléments qui doivent entrer dans sa composition. On conçoit que l'on ne doit avoir recours à ce second mode de fabrication qu'à défaut de carbonate hydraulique naturel.

Lorsqu'on aura besoin de se procurer de la chaux hydraulique dans une localité, on se guidera dans ses recherches en se rappelant que c'est le mélange de l'argile au carbonate calcaire qui fournit toutes les variétés de chaux hydrauliques, et que par conséquent les carrières où alternent les bancs d'argile et de pierre calcaire sont celles où il y aura le plus de chances de succès, quand toutefois ces bancs feront partie d'une même formation. Il ne faut pas négliger ces recherches parce que dans la localité on n'a encore fabriqué que de la mauvaise chaux; cela peut provenir de l'absence ou de la mauvaise direction de recherches antérieures; ainsi, à Paris, on a fait venir pendant longtemps de la chaux hydraulique de Senonches, qui coûte 80 fr. le mètre cube, tandis que les buttes Montmartre, Chaumont et Romainville contiennent

des calcaires fournissant en abondance toutes les variétés de chaux hydrauliques.

Comme on ne rencontre aucun calcaire argileux dans les divisions supérieures du *terrain crétacé supérieur* (504), il est inutile d'y faire des recherches; mais les divisions inférieures sont plus favorables, on y rencontre une craie marneuse qui repose sur l'argile du gault auquel elle est souvent liée par une transition insensible. On y trouve une proportion d'argile d'autant plus grande que l'on s'approche davantage du gault; ainsi, de 7 à 8 pour 100 que contiennent les bancs supérieurs, on arrive quelquefois à 40 ou 45 pour 100. Les chaux hydrauliques provenant de cette formation ont quelquefois l'inconvénient d'éprouver un retrait sensible quand, après avoir été placées sous l'eau, elles se trouvent exposées à l'air; pour éviter cet effet, dangereux dans les constructions, on fait le mortier très-ferme et avec un bon sable siliceux.

Les calcaires que l'on rencontre dans le *terrain crétacé supérieur* donnent de bonnes chaux hydrauliques, mais ils ne s'y trouvent en général qu'en couches très-minces ou en rognons.

Dans certaines localités, le *terrain suprajurassique* fournit des calcaires contenant de l'argile et du carbonate de magnésie. Lorsque l'argile est en proportion convenable (de 8 à 10 pour 100), ce calcaire donne une bonne chaux hydraulique. La présence de l'argile se reconnaît par une couleur jaune foncé ou brun, une forte odeur terreuse et un toucher onctueux.

L'étage jurassique supérieur, qui comprend toutes les formations à grandes alternances de calcaires et de marnes, se divise en plusieurs groupes intéressants à étudier sous le rapport de leurs produits en chaux hydrauliques.

Les *calcaires portlandiens* supérieurs contiennent des dolomies vertes qui donnent de la chaux hydraulique; mais ceux inférieurs n'en renferment pas.

Les *calcaires kimméridiens* supérieurs et les marnes calcaires de ce groupe jouissent de propriétés hydrauliques variables, mais faibles en général. Dans l'étage moyen et dans l'étage inférieur, ces qualités sont plus prononcées, et les chaux hydrauliques qu'on en tire seraient excellentes si, par l'effet des fossiles qui y abondent quelquefois, elles n'avaient pas l'inconvénient de se diviser en strates.

L'*oxford-clay* est abondant en calcaire argileux fournissant de la bonne chaux hydraulique.

La *grande oolite* ou *oolite inférieure* contient des calcaires argileux et magnésiens.

Le *lias*, surtout, renferme des assises marno-calcaires à chaux hydrauliques et à ciments.

Dans le terrain *keuprique*, les *marnes irisées* fournissent des calcaires magnésiens.

Le *muschelkalk*, plus riche en pierre de taille très-dure qu'en chaux hydraulique, fournit cependant quelquefois des calcaires marneux et des calcaires argilo-magnésiens donnant de la chaux hydraulique.

Les formations du *grès bigarré* et du *zechstein* sont dans le même cas que le muschelkalk.

En remontant encore l'échelle géognostique, arrivé au *terrain de transition*. on ne trouve plus que du calcaire pur.

Les indications précédentes peuvent guider dans la recherche des pierres à chaux hydrauliques; mais, comme souvent au-dessus et au-dessous d'un banc de calcaire argileux se trouve du calcaire pur, on est obligé, pour s'assurer des propriétés de la chaux, d'avoir recours à quelques essais.

Si en traitant le calcaire par l'acide chlorhydrique toute la masse se dissout, on est sûr qu'il ne peut fournir qu'une chaux grasse; si au contraire il reste un produit insoluble, on doit s'attendre à obtenir une chaux maigre; mais pour savoir si elle est hydraulique ou non, il faut faire cuire un échantillon de cette pierre, excepté quand le résidu insoluble est un sable grossier, car alors on est sûr que la chaux ne vaudra rien. Cependant, comme les chaux maigres non hydrauliques sont rares en comparaison des chaux hydrauliques, il y a espoir de succès, dès qu'on obtient un résidu insoluble.

Voici ce que dit M. Vicat au sujet de la recherche des chaux hydrauliques: « Il est peu de départements, les pays granitiques exceptés, où l'on ne puisse rencontrer du calcaire argileux. Il faut le chercher avec persévérence; les indications de MM. les ingénieurs des mines peuvent être d'un grand secours; conclure la non-existence de la pierre à chaux hydraulique de la nature de la masse principale, que les accidents du sol mettent en évidence, serait une erreur; la composition du calcaire varie à chaque instant, et souvent celui que l'on cherche n'est qu'à une petite distance de la pierre à chaux commune; l'une et l'autre se trouvent quelquefois dans la même carrière, séparées seulement par un ou deux bancs. Les renseignements des maçons et des chaufourniers peuvent être d'ailleurs d'un utile concours; si on les interroge sur les diverses chaux des pays qu'ils habitent, ils ne manquent jamais de désigner les chaux hydrauliques comme les plus mauvaises, il faut insister pour qu'ils en fassent mention. »

522. *Chaux hydrauliques artificielles.* Lorsque les recherches et les essais indiqués au numéro précédent ne conduiront à aucun résultat satisfaisant, on aura recours à la chaux hydraulique artificielle, que l'on fabriquera de toutes pièces, par un des deux procédés que nous allons examiner.

Le premier procédé consiste à mélanger à du carbonate calcaire réduit en bouillie, de l'argile dans les proportions qui donnent à la chaux le degré d'hydraulicité dont on a besoin (520). Ce mélange, réduit en pains et soumis à la cuisson, fournit de bons produits.

Le calcaire marneux est un calcaire ordinairement friable, facile à écraser et à réduire en bouillie. Comme il contient toujours une cer-

taine quantité d'argile, quelquefois assez grande pour produire de la chaux hydraulique ou de la chaux-ciment, on est obligé, pour déterminer la dose d'argile à y ajouter, de le soumettre préalablement à des essais chimiques ou à des essais de cuisson.

On voit que ce procédé exige que la pierre calcaire soit d'abord écrasée. Comme le calcaire marneux et la craie sont seuls susceptibles d'être soumis économiquement à cette opération, en leur absence, on aura recours au second procédé, qui consiste à mélanger une proportion convenable d'argile à de la chaux grasse éteinte et mise à l'état de pâte, et à soumettre ce mélange, réduit préalablement en pains, à une seconde calcination.

D'après M. Vicat, les chaux ordinaires très-grasses peuvent comporter 20 pour 100 d'argile; les chaux moyennes en ont assez de 15 à 10, et 6 suffisent pour celles qui ont déjà quelques qualités hydrauliques. Lorsqu'on force la dose jusqu'à 33 ou 40, la chaux que l'on obtient ne fuse point, mais elle se pulvérise facilement et donne, lorsqu'on la détrempe, une pâte qui prend très-promptement corps sous l'eau. Les qualités de l'argile peuvent d'ailleurs influer aussi sur les proportions.

Une fois que les proportions des matières qui doivent entrer dans la chaux sont déterminées, on en opère le mélange au moyen d'un manége semblable à celui que l'on emploie pour la fabrication des mortiers, dans les grands chantiers de construction, et dont nous allons donner les dimensions principales.

Ce manége porte trois roues de 1^m,80 de diamètre, analogues à des roues de voitures, et dont la largeur de jante est de 0^m,15 pour l'une et 0^m,10 pour chacune des deux autres. Ces roues tournent dans une auge circulaire dont la section transversale est un segment circulaire; la roue de 0^m,15 de jante suit le milieu de l'auge, et les deux autres suivent des ornières intérieure et extérieure en empiétant de 0^m,02 à 0^m,03 sur celle de la première. L'auge, qui a 1^m,15 de diamètre intérieur, 1 mètre de largeur et 0^m,38 de profondeur, est dallée en granit, ou mieux en plaques de fonte pour avoir moins de joints. Les roues peuvent s'élever ou s'abaisser dans l'auge, à l'aide de deux oreilles traversées par un goujon horizontal et fixées sur les deux faces latérales des essieux. Tout le système tourne autour d'un goujon vertical fixé à la partie supérieure d'un arbre en bois maintenu solidement en terre. Un rabot en fer, qui a la forme de la section transversale de l'auge, détache dans son mouvement la matière qui peut se fixer aux parois de l'auge. Ce rabot est disposé de manière à pouvoir s'élever ou s'abaisser librement, selon que la quantité de matière qui se trouve dans l'auge est plus ou moins considérable.

Un tel manége est mû par deux chevaux qui suivent un cercle de 4^m,45 de rayon; mais l'on conçoit que, suivant l'importance de l'exploitation, on peut ne mettre que deux roues au manége, en diminuant

la largeur de l'auge en conséquence, et opérer la manœuvre avec un seul cheval. La roue la plus large est montée sur un des bras du manége, et les deux autres sur un essieu perpendiculaire aux bras.

Quand le calcaire est écrasé et réduit en bouillie, ou que la chaux est délayée bien également dans l'auget, on y verse, aussi uniformément que l'on peut, la quantité d'argile convenable, et on continue la trituration jusqu'à ce qu'on n'aperçoive plus de parcelles d'argile; alors on ouvre une vanne pratiquée dans la paroi extérieure de l'auget, et la boue liquide qu'elle contient s'écoule dans une fosse pratiquée à proximité, dans un terrain perméable. Quelques tours de manége, après l'ouverture de la vanne, suffisent pour que le rabot fasse écouler toute la matière par la vanne.

De la première fosse, qui doit avoir de 0m,60 à 0m,80 de profondeur, on fait couler la matière dans une autre, où on lui laisse acquérir une consistance qui permette de la mettre en pains, soit à la main, soit à l'aide d'un moule. On laisse les pains se dessécher à l'air, à la manière des briques, si ce n'est que leur peu de consistance ne permettant pas de les empiler les uns sur les autres en laissant du jeu entre eux, on est obligé de placer chaque étage de pains sur des lattes reposant sur des entretoises horizontales fixées à des montants qui supportent une toiture.

Les pains une fois desséchés à l'air, on les cuit de la même manière que la chaux naturelle, si ce n'est qu'étant moins compactes, ils sont plus facilement pénétrés par la chaleur et exigent un feu moins vif.

523. *Cuisson de la chaux.* Elle s'opère dans des fours à feu continu, à l'aide de la houille, ou dans des fours à feu discontinu, avec de la houille, de la tourbe ou du bois.

La fig. 19, pl. II, représente la coupe par l'axe d'un four à feu continu. Il a la forme d'un tronc de cône renversé, dont le petit diamètre a au moins 1 mètre, et quelquefois 3m,30 comme à Tournay; le grand diamètre varie de 2 mètres à 6 mètres, et la hauteur, de 3 mètres à 10m,80.

Pour charger ce four, on commence par former dans le bas du tronc de cône une voûte en pierre calcaire, laquelle est soutenue par deux barres de fer qui forment une espèce de grille. Sur cette voûte on place une couche de houille, et dans le foyer qui est réservé sous la voûte, on enflamme un feu de bois; ce feu allume la première couche de houille, que l'on couvre d'une couche de calcaire, puis d'une couche de houille et ainsi de suite, jusqu'à la partie supérieure du four; mais en ayant soin de ne placer les nouvelles couches qu'au fur et à mesure que le feu s'élève, comme pour la cuisson des briques à la volée (513).

Quand la pierre du bas est cuite, on la fait couler avec un ringard, et on la retire en réglant la vitesse de l'enlèvement sur le temps reconnu nécessaire pour la calcination de la chaux; ce temps est géné-

ralement de deux à trois jours. On a soin de mettre de nouvelles couches de calcaire et de houille dans le four, à mesure que la masse s'affaisse.

La quantité de houille brûlée varie de 1,50 à 2 ou 2,25 hectolitres par mètre cube de calcaire. Pour que la calcination soit égale et facile, on casse le calcaire en morceaux de 7 à 8 centimètres de côté. Pour la chaux artificielle, les pains peuvent avoir de plus grandes dimensions (522).

La fig. 20, pl. II, représente la coupe verticale par l'axe du four à cuisson continue employé à Tournay. Ce four a 6 mètres de diamètre à la partie supérieure et 3ᵐ,30 à la partie inférieure. Le grand diamètre du tronc de cône, à base supérieure arrondie, placé au bas du four pour chasser la chaux cuite vers les huit orifices qui servent à la retirer, a 2ᵐ,10. La hauteur totale du four, depuis la base du tronc de cône, est de 10ᵐ,80.

Un tel four contient 130 mètres cubes de calcaire, dont les morceaux sont de grosseurs très-variables, il y en a qui pèsent jusqu'à 25 kilog. La chaux reste trois jours dans le four; on brûle de 1,25 à 1,75 hectolitres de charbon de Fresnes, qui est impropre à la fabrication du coke, pour cuire 1 mètre cube de chaux.

On paye 0f,36 au chaufournier pour charger le four, surveiller la cuisson, retirer la chaux du four et la charger en bateau à un relais de distance.

Les voûtes VV' forment un carré régnant tout autour du four. Le massif du four présente, en plan, un carré à l'intérieur des voûtes, c'est-à-dire en CD, ainsi qu'à l'extérieur en AB. On pénètre sous les voûtes par 3 ouvertures, dont 2 sont placées sur une même face

Les tablettes qui forment le sol des orifices par lesquels on retire la chaux font des saillies sous lesquelles on fait avancer les brouettes dans lesquelles on fait tomber directement la chaux; ces brouettes cubent 1 hectolitre.

Si la charge du four ne descend pas partout également, on place des gros blocs de calcaire mélangés de charbon sur la partie qui ne s'affaisse pas; ces blocs, ne se cuisant pas complétement, augmentent la charge dans cette partie, et détachent les morceaux qui se sont accrochés à la paroi. On rend aussi le feu partout uniforme en laissant de plus grands vides entre les pierres que l'on place dans les parties où il est le moins intense.

La chaux cuite dans ces fours se vend de 7 à 9 fr. le mètre cube, quoique l'extraction de la pierre se fasse à la poudre dans des carrières placées au-dessous de la nappe d'eau, ce qui nécessite des épuisements à l'aide de machines à vapeur.

La pierre renferme 10 pour 100 d'argile; c'est un calcaire fétide de la formation oolitique (504).

Les fours à cuisson continue exigent que l'on surveille la marche du feu. Si le vent vient frapper dans la direction de l'orifice du four, il faut masquer cet orifice par des toiles ou des paillassons; car autrement le feu deviendrait trop vif, et la chaux se fritterait.

Dans les localités où la houille manque, on est obligé de cuire la chaux avec du bois dans des fours à feu discontinu.

Pour obtenir une bonne cuisson, avec le moins de combustible possible, M. Petot, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a construit, à l'arsenal de Brest, le four à deux compartiments représenté en coupe verticale pas la fig. 21, pl. II (*Annales maritimes*, année 1833). C'est par une série d'essais que M. Petot est arrivé à cette forme et aux dimensions suivantes, reconnues les plus favorables :

Compartiment inférieur.

Diamètre de la grille.	1m,05
Hauteur de la grille au-dessus du sol.	0 ,50
Diamètre inférieur du compartiment.	2 ,55
AA diamètre maximum.	3 ,55
Distance de AA à la grille.	1 ,30
BB sommet de la charge cuite, diamètre.	2 ,24
Distance de BB à AA.	3 ,00
Diamètre à la partie supérieure.	1 ,70
Distance de BB à l'ouverture du foyer supérieur. . . .	0 ,50
Entrée du foyer. 0m,40 sur.	0 ,40
Entrée du cendrier, 0m,50 sur.	0 ,50

Compartiment supérieur.

Diamètre inférieur de ce compartiment.	2m,30
Diamètre maximum CC.	2 ,46
Distance de CC au seuil de l'ouverture du foyer.	1 ,30
DD sommet de la charge cuite, diamètre.	1 ,55
Distance de DD à CC.	2 ,50
Distance de DD à l'orifice supérieur.	0 ,50
Diamètre à l'orifice.	1 ,00
Épaisseur de la maçonnerie en EE.	2 ,00
Id. *id.* en FF.	1 ,60
Volume de chaux cuite dans le compartiment supérieur.	10mc,50
Id. *id.* inférieur.	26mc,50
Largeur des barreaux de grille.	0m,03
Distance d'axe en axe des barreaux de grille.	0 ,04

Pour charger le four, on fait au-dessus de chaque foyer, avec des morceaux de calcaire de 0m,16 à 0m,20 d'épaisseur, une voûte en ogive, représentée dans la figure par une ligne pointée. Sur cette voûte, on entasse le calcaire, de manière que les morceaux diminuent en grosseur, depuis le bas jusqu'en haut, ainsi que du centre au pourtour du four; on prend cette précaution afin de rendre, autant que possible, la cuisson uniforme. Des rondins convenablement placés dans la charge

laissent, en se brûlant, des cheminées qui distribuent uniformément la chaleur, en la dirigeant vers les parois; il faut éviter d'en placer au-dessus de l'opposite de l'entrée du foyer, où le courant d'air qui arrive porte naturellement la flamme.

Le four étant rempli, on ferme avec de la maçonnerie le vide du cendrier supérieur, en y laissant seulement un petit regard, que l'on ouvre à volonté, pour examiner au besoin les progrès du chauffage à l'entrée du compartiment supérieur.

Les fagots et le bois refendu conviennent pour ce chauffage, parce que leur flamme longue monte à travers la charge, et que, faisant peu de brasier, il y a moins de chance que la partie inférieure du calcaire dépasse le point convenable de cuisson. On est quelquefois obligé, au commencement du chauffage, d'allumer quelques fagots dans le foyer supérieur pour faciliter le tirage.

Jusqu'à ce que toute la masse soit échauffée, l'eau qui se dégage pendant la combustion, ainsi que le carbone entraîné, se déposent sur les pierres froides, qui deviennent noires; vers cette époque du chauffage, il arrive, si le feu est trop ardent, que les pierres éclatent avec bruit; quand on entend ces explosions, il convient de ralentir le feu jusqu'à ce que les pierres aient perdu leur eau de carrière.

Chaque charge se compose de quatre fagots de 1 mètre de longueur et pesant chacun de 7k,50 à 10 kilog.; on réduit quelquefois ce nombre à trois et d'autres fois on le porte à cinq. On dispose les fagots autour de la grille, en en laissant un dans l'entrée du foyer, de manière que, brûlant par l'extrémité, il fournisse la flamme à la partie antérieure du four, et qu'il brûle les filets d'air qui pénètrent par le contour de la porte et le guichet de 0m,08 à 0m,10 de côté, placé dans le milieu de la maçonnerie de cette porte. Ce guichet sert à voir ce qui se passe dans le foyer; on le ferme à l'aide d'un tampon en terre à brique. Chaque chargement s'effectue quand il n'y a plus que du brasier sur la grille, et que le courant de flamme amaigri permet de voir les pierres de la voûte; si l'on attendait trop, l'air froid, dont l'arrivée est constante, refroidirait les pierres.

Au bout des dix premières heures de feu, la dépense en combustible reste à peu près constante.

***TABLEAU** indiquant la marche de la cuisson, il est analogue à celui donné pour la brique* (513).

HEURES de chaque quart.	Nombre de fagots brûlés dans le compartiment inférieur pendant le												compartim. supér. pendant le		
	1er quart	2e quart	3e quart	4e quart	5e quart	6e quart	7e quart	8e quart	9e quart	10e quart	11e quart	12e quart	1er quart	2e quart	3e quart
1	5	35	38	49	43	42	40	41	38	42	39	38	19	35	28
2	15	33	40	50	40	40	40	43	40	41	40	38	24	32	33
3	19	36	37	48	49	38	40	41	43	39	42	24	28	36	36
4	25	34	39	50	45	42	40	39	41	42	40	»	31	33	34
5	28	37	48	40	41	40	42	40	39	43	41	»	33	29	34
6	31	35	51	41	44	40	40	42	40	41	44	»	31	31	»
Pour chaque quart.	123	210	253	278	253	242	242	246	241	248	246	100	166	196	165

Pendant soixante-huit heures et demie de feu dans le compartiment inférieur, on a brûlé 2682 fagots, et pendant dix-sept heures de feu dans le compartiment supérieur, on en a brûlé 527; ce qui fait un total de 3209 fagots pour quatre-vingt-cinq heures et demie de feu. Chaque fagot pesant 9k,25, on a donc brûlé 29683 kilog. de bois pour 37 mèt. cubes de chaux; ce qui fait 802 kilog. par mètre cube.

Comme les pierres du bas sont cuites avant celles du haut, pour éviter leur surcalcination, après vingt ou vingt-quatre heures de feu, on met dans la cuvette K, placée en avant du foyer, de l'eau que l'on élève jusqu'au niveau du cendrier. La vapeur produite par la chaleur que rayonne le foyer, non-seulement empêche la surcalcination, mais aussi facilite le dégagement de l'acide carbonique que peuvent encore contenir quelques morceaux. On ramène dans la cuvette, à l'aide d'un rabot, toute la cendre qui s'entasse dans le cendrier, au-dessus du niveau de l'eau. On maintient le niveau de l'eau constant dans la cuvette, à l'aide d'un réservoir extérieur. La quantité d'eau évaporée pendant la calcination s'élève à 3 mètres cubes environ, déduction faite des pertes par infiltration à travers la maçonnerie.

La vapeur d'eau joue un rôle tel dans la décomposition du carbonate, que si après avoir desséché complétement un morceau de carbonate, on le soumet à la cuisson, sa décomposition est impossible, au lieu que si l'on fait arriver dessus de la vapeur d'eau, le dégagement de l'acide carbonique a lieu immédiatement.

La cuisson de la chaux est opérée quand le tassement de la masse est

de 0m,50 environ, ou mieux, quand on peut enfoncer dans cette masse une barre de fer avec autant de facilité que dans un tas de chaux. Ces essais se font par l'ouverture placée sous le foyer supérieur; pendant qu'ils durent, on tient hermétiquement fermé le foyer et le cendrier inférieurs, sans quoi, l'air chaud et la flamme sortant par l'ouverture, il serait impossible d'en approcher. Une fois la cuisson terminée dans le compartiment inférieur, on commence le feu dans le foyer supérieur. Ce foyer est sans grille, on place les fagots debout sur la chaux du compartiment inférieur. Pendant toute la durée du feu dans le foyer supérieur, on ne laisse qu'une ouverture de 0m,10 au cendrier inférieur, et le cendrier supérieur se tient fermé. Quand la cuisson est également opérée dans ce compartiment, ce qui se vérifie plus facilement que pour le compartiment inférieur, mais par des moyens semblables, on arrête le feu, on ferme hermétiquement tous les orifices, et douze heures après on commence à défourner.

524. *Extinction de la chaux.* On distingue cinq manières de l'opérer, nous allons les passer en revue (533).

1° *Extinction par fusion* ou *extinction ordinaire.* Elle consiste à placer la chaux dans un bassin avec la quantité d'eau convenable, et à l'agiter pour réduire le tout en pâte. Il faut avoir soin, pour les chaux grasses, de verser en une seule fois toute l'eau nécessaire, afin de n'être pas obligé d'en ajouter pendant l'effervescence. Dans le cas de nécessité d'une nouvelle quantité d'eau, il faut attendre le refroidissement pour l'ajouter. La méthode qui consiste à noyer la chaux d'une grande quantité d'eau et à la faire couler dans un bassin perméable, doit être proscrite.

Ce procédé ne peut être usité pour la chaux hydraulique, elle fuse trop lentement; on l'emploie généralement pour la chaux grasse, parce qu'elle foisonne plus que par les autres procédés; mais il convient, pour qu'elle donne une bonne maçonnerie, d'y mélanger un peu de pouzzolane.

Sur les grands chantiers, les bassins se font en maçonnerie; dans les autres cas, on les fait en plats-bords maintenus par des chevillettes en fer ou par des piquets en bois, en ayant soin de les garnir de glaise ou de plâtre pour empêcher l'eau de sortir.

Lorsque la chaux doit être conservée après son extinction, il faut la recouvrir d'une couche de sable que l'on humecte de temps en temps.

2° *Extinction ordinaire modifiée pour l'emploi de la chaux hydraulique*, d'après M. Vicat. La chaux hydraulique, prise vive et en pierre, se jette à la pelle dans un bassin imperméable, où on l'étend par couches d'égale épaisseur (de 20 à 25 centimètres); on y amène l'eau au fur et à mesure, et de telle manière qu'elle puisse circuler et pénétrer avec facilité dans les vides que les fragments de chaux vive laissent entre eux. L'effervescence ne tarde guère à se manifester. On continue à jeter alternativement de la chaux et de l'eau, mais en ayant bien soin de se garder de brasser la matière et de la réduire en laitance, selon la mauvaise habitude de quelques maçons; seulement, quand, par hasard, quelques parties de chaux fusent à sec, on y dirige l'eau par des rigoles que l'on trace légèrement dans la pâte avec une pelle, et de temps en temps on enfonce un bâton pointu dans les endroits où l'on soupçonne que l'eau a pu manquer. Si le bâton en sort enduit d'une chaux gluante, l'extinction est bonne; s'il s'en élève au contraire une fumée farineuse, c'est que la chaux fuse à sec; on élargit alors le trou, on en fait d'autres à côté et on y amène l'eau.

On ne doit ainsi éteindre que la quantité de chaux hydraulique dont on a besoin pour la consommation d'une journée. Deux bassins séparés, ou deux capacités dans le même bassin sont indispensables. On remplit l'un quand l'autre est près d'être vidé. C'est ordinairement sur la fin du jour que l'extinction a lieu; par ce moyen la chaux a vingt-quatre heures pour travailler, et les morceaux paresseux se divisent tous.

La chaux ainsi éteinte est déjà très-ferme le lendemain, il faut la piocher ou au moins la couper avec une pelle tranchante pour l'extraire. Il semble qu'en cet état elle ne puisse plus être ramenée à l'état de pâte sans une addition d'eau, mais c'est une erreur.

Si au lieu d'être prise vive, la chaux hydraulique a déjà subi l'immersion, les bassins deviennent inutiles; on règle la dose d'eau de manière à atteindre à peu près le même degré de consistance que par l'autre procédé.

Le procédé qui vient d'être décrit est généralement usité pour la chaux hydraulique; cependant, certaines chaux hydrauliques, entre autres celle de Senonches, ne donnent pas de bons résultats quand elles sont éteintes de cette manière; il vaut mieux avoir recours à l'aspersion, la prise est infiniment plus prompte.

3° *Extinction par aspersion.* Elle consiste à placer la chaux dans des bassins circulaires formés avec du sable; à l'asperger, à l'aide d'un arrosoir à pomme, d'une quantité d'eau suffisante pour la réduire en pâte; à la couvrir immédiatement avec le sable, et à ne l'agiter et fabriquer le mortier que quand la fusion est complète. Dans cette extinction, si la chaux est grasse, il se produit un grand dégagement de chaleur qui paraît faciliter l'extinction, qui est complète au bout de deux ou trois heures. Il n'y a que des essais comparatifs qui peuvent faire donner la préférence à ce mode d'extinction ou au précédent.

Ce procédé est beaucoup employé par les paveurs et les maçons de province; mais pour les chaux hydrauliques il a rarement la préférence sur le mode précédent.

4° *Extinction par immersion.* Elle consiste à réduire la chaux vive en morceaux de la grosseur d'une noix, à la placer dans un panier, que l'on plonge dans l'eau, en l'y tenant jusqu'à ce que la superficie de l'eau commence à bouillonner; alors on le retire, on le laisse égoutter un instant et on verse la chaux dans des caisses ou des futailles qui concentrent la chaleur. Une grande partie de l'eau ne pouvant s'échapper, elle est prise par la chaux, qui se réduit en poudre et que l'on convertit ensuite en pâte.

Ce procédé n'a pas sur les qualités de la chaux l'influence qu'on lui avait attribuée, et comme il est coûteux, il est très-rarement employé.

5° *Extinction spontanée.* Elle consiste à laisser la chaux exposée à l'air, dont elle absorbe l'humidité, en se transformant en hydrate. Cet hydrate contient 0,22 de son poids d'eau, et en y ajoutant de l'eau, on obtient une pâte susceptible d'être employée. Ce mode d'extinction convient aux chaux grasses, car l'exposition à l'air transforme quelques particules en carbonate de chaux, ce qui facilite le durcissement. On ne doit pas l'employer pour la chaux hydraulique, cette chaux perdant ses qualités à l'air; c'est pour cette raison qu'on ne peut conserver la chaux éteinte par ce procédé que pendant un certain nombre de mois, et encore en prenant toutes les précautions possibles pour la préserver du contact de l'air et de l'humidité.

525. *Foisonnement de la chaux.* Le foisonnement à l'extinction est variable suivant l'espèce de chaux et le mode d'extinction employé.

Les chaux non hydrauliques très-grasses, éteintes en bouillie épaisse par fusion, prennent un volume qui atteint 2,5 à 3 fois le volume primitif; pour des chaux maigres, le volume de la pâte n'est que 1,50 et même 1,25 fois le volume primitif.

Pour les chaux hydrauliques, le foisonnement est également très-variable. L'expérience a donné les résultats du tableau suivant :

DÉSIGNATION DE LA CHAUX HYDRAULIQUE.	MODE D'EXTINCTION.	VOLUME après l'extinction.
Naturelle de Bourgogne.	Fusion.	1.55
Id	Immersion.	1.85
Naturelle des buttes Chaumont.	Fusion.	1.50
Id.	Immersion.	1.78
Artificielle des buttes Chaumont.	Fusion.	1.59
Id.	Immersion.	1.75
Naturelle d'Issy.	Fusion.	1.62
Naturelle des Moulineaux.	*Id*.	1.47

526. *Ciment hydraulique* ou *pouzzolane*. Sous ce nom, on désigne un produit volcanique provenant de débris de laves poreuses ou dures, telles que les basaltes. Nous avons donné leurs propriétés 4°, page 658.

La pouzzolane varie de couleur; il y en a de la blanche, de la noire, de la jaune, de la grise, de la brune et de la violette; celle de Rome est d'un rouge brun mêlé de particules brillantes comme du métal.

527. *Fabrication de la pouzzolane artificielle*. Un composé d'une à trois parties de chaux pour neuf à sept d'argile, soumis à une chaleur nécessaire au premier degré de cuisson de la brique, donne la pouzzolane (520).

Comme pour la chaux hydraulique (522), quand on n'a pas de matières qui renferment naturellement ces proportions, on peut préparer la pouzzolane de toutes pièces; c'est ce que l'on a fait au pont aqueduc de Guétin, sur l'Allier, et à celui de Digoin, sur la Loire, où les matières employées étaient composées d'une partie en volume de chaux grasse cuite et éteinte à l'état de pâte molle, et de quatre parties d'argile, ou plutôt d'une terre argileuse trouvée sur les lieux et amenée par une addition d'eau à la même consistance que la chaux. On opérait ensuite le mélange de ces matières, en les maintenant à la consistance de pâte à brique ordinaire, à l'aide d'un manége à deux roues, semblable à celui employé sur les grands ateliers, à la fabrication du mortier, et dont il a été question pour opérer le mélange des matières employées à la fabrication de la chaux hydraulique artificielle (522).

Le fond de l'auge du manége avait 0m,20 de largeur, et son rayon moyen 1m,50; les roues avaient 0m,10 de largeur de jante, et leurs ornières empiétaient de 0m,02 à 0m,03 l'une sur l'autre. Deux hommes rejetaient dans l'intérieur de l'auge les matières qui s'attachaient à ses parois et aux roues; une charrue est peu avantageuse, à cause de la facilité avec laquelle les matières s'y fixent.

La charge de l'auge était de $0^{mc},60$, et son mélange durait une heure. Un cheval décrivant un cercle de 5 mètres de rayon suffisait pour conduire le manége en travaillant de huit à dix heures par jour.

Une fois les matières mélangées, on les mettait en pains de la forme d'un prisme triangulaire, au moyen d'un moule imaginé par M. Saint-Léger. Deux hommes fabriquaient en une journée de douze heures de travail 3000 à 3500 pains, dont 650 formaient le mètre cube.

Les pains une fois moulés, on les desséchait en les exposant au soleil; par un beau temps d'été, la dessiccation durait de sept à huit jours. Après cette opération, on emmagasinait les pains sous un hangar couvert, pour les mettre à l'abri de la pluie.

La cuisson s'opérait avec de la houille, mais l'on peut employer le bois. On avait soin de ménager le feu, surtout au commencement de l'opération et jusqu'à la parfaite dessiccation des pains. Avec un petit feu bien conduit, la cuisson d'une fournée peut durer de trente à quarante heures. La cuisson s'opère dans des fours semblables à ceux qui servent à cuire la chaux au moyen du bois (523).

Au pont-aqueduc de Guétin, on a fait usage d'un double four représenté en coupes verticale et horizontale par les fig. 22 et 23, planche II. Sur les faces inclinées du massif qui sépare les deux foyers, on fait des cannelures avec des briques de champ; ces cannelures, faisant office de cheminées, font que la flamme arrive aussi facilement dans le milieu du four que dans les parties qui se trouvent au-dessus des foyers.

On supporte la charge, au-dessus des foyers, à l'aide de voûtes à claire-voie en briques réfractaires.

Un tel four peut contenir 7000 pains, qui fournissent de quoi faire environ 10 mètres cubes de pouzzolane. Il faut un jour pour le charger, un jour et demi pour la cuisson, et deux jours et demi pour le refroidissement du four et le déchargement, ce qui fait cinq jours par fournée.

M. Saint-Léger a encore établi des fours plus petits que le précédent et qui portent des séchoirs où on opère la dessiccation des pains avant la cuisson; mais ils sont moins avantageux que le précédent. Du reste, en prenant un peu l'avance pour le mélange des matières et la dessiccation naturelle des pains, on peut, en général, dans la saison des travaux, se passer de ces séchoirs.

A Digoin, pour pulvériser la pouzzolane, M. Saint-Léger a fait usage d'un manége garni d'une meule en pierre du poids de 650 à 700 kilog. La meule se mouvait sur une plate-forme entourée d'une auge, contre la paroi intérieure de laquelle se trouvait un tamis incliné. Un soc de charrue agitait la matière derrière la meule, et une planche convenablement disposée la faisait tomber de temps en temps sur un tamis destiné à séparer les parties encore trop grosses de la matière convenable-

ment broyée; les parties rejetées par le tamis étaient replacées sous la meule.

Un pareil manége peut, en douze heures de travail, pulvériser de 2 mèt. cubes à 2^{m},50 de pouzzolane. M. Mary pense que l'on obtiendrait de meilleurs résultats de pulvérisation au moyen de cylindres à disques en fonte isolés tant pleins que vides, que l'on ferait rouler sur une plate-forme où l'on aurait répandu la matière; ces disques diviseraient la matière, au lieu d'en faire une masse compacte comme la meule. Ces cylindres sont employés par M. Payen, à Grenelle, pour pulvériser de la matière désinfectante; les disques ont 0^{m},02 d'épaisseur, et ils sont écartés d'autant; leur diamètre est de 0^{m},40 environ.

A Guêtin, le prix d'un mètre cube de pouzzolane, non compris les frais d'établissement faits par l'administration, s'est élevé à 28 fr., et au pont de Digoin, à 26 fr. Ces prix comprennent les achats de terre et de chaux, leur transport, leur mélange, la fabrication des pains; la cuisson, qui exige environ trois hectolitres de houille, estimés seulement à 3 fr. 50 pour Digoin, par mètre cube de pouzzolane; la pulvérisation, la livraison à la régie dans des caisses de dimensions déterminées, le transport de la matière dans les différents points de l'atelier; l'entretien des fours, manéges et hangar; enfin, les frais d'outils et les bénéfices, qu'à Digoin on a cotés ensemble à 3 fr. 40 par mètre cube de pouzzolane.

Frais d'établissement d'un matériel destiné à fournir de 2 à 2,50 mètres cubes de pouzzolane par jour.

Manége à mélanger l'argile et la chaux.	500 fr.
Un four avec ses abords.	600
Un hangar pour abriter les pains avant leur cuisson.	300
Un manége à pulvériser, avec un hangar assez étendu pour recevoir d'un côté la pierre à pulvériser, et de l'autre l'approvisionnement de pouzzolane pulvérisée.	2600
Total	4000

Pour des travaux de peu d'importance, on ne peut faire des frais aussi considérables; on se contente de cuire la pouzzolane dans un four ordinaire à chaux ou à briques, sauf à avoir quelques briquettes vitrifiées par l'effet des cendres de charbon qui aident à la fusion de la silice.

La pouzzolane se conserve plus facilement avant d'être employée que la chaux hydraulique, et, de plus, elle permet de donner au mortier le degré d'énergie dont on a besoin, ce qui est impossible avec la chaux hydraulique.

528. *Fabrication de la pouzzolane artificielle avec diverses matières.* M. Vicat rapporte que l'on a fabriqué de la pouzzolane avec une terre

dolomitique. Cette terre, exploitée par entailles et coins de bois, se subdivisait en petites mottes que l'on séchait au soleil ou sous des hangars pour les cuire ensuite dans un four à chaux ordinaire. La cuisson exigeait un hectolitre de charbon pour seize à dix-huit hectolitres de terre.

Détail des dépenses pour la campagne entière.

Construction du four.	110 fr.	00 c.
Id. du hangar.	167	70
Exploitation. . . . . 582 jours 1/2.	707	40
Cuisson. . . . . 202 *id.*	309	50
Pilonage par des femmes, 281 *id.*.	204	75
Surveillance.	200	00
Houille, 130 quintaux métriques.	174	00
Outils.	85	25
Dépenses diverses.	7	75
Dépense totale pour 211^{mc},75 de pouzzolane.	1966 fr.	35 c.
Ce qui fait par mètre cube.	9 fr.	28 c.

A Calais, on fabrique de l'excellente pouzzolane en cuisant de la terre argilo-calcaire provenant des plages de la mer. Cette terre est produite par les vases calcaires qui résultent de la destruction des falaises de la côte de Normandie et du limon argileux provenant, soit des alluvions des cours d'eau, soit des couches d'argile couvrant le sommet des falaises. Cette terre s'extrait dans la plage, se sèche et se cuit comme la pâte de pouzzolane artificielle (527).

A Brest, où il existe des masses considérables de sable de gneiss, on a soumis ce sable à la calcination dans des fours à réverbère, et on a obtenu une pouzzolane, non très-énergique, mais cependant assez pour que, mélangée à la chaux, le mortier durcisse en sept jours.

529. *Ciment romain.* Depuis plusieurs années on emploie avec de grands avantages, dans les constructions hydrauliques, une substance désignée vulgairement sous le nom de *ciment romain* (520), qui possède à un degré supérieur toutes les propriétés des chaux hydrauliques : ainsi le mortier fait avec cette matière acquiert presque instantanément, à l'air et dans l'eau, une plus grande dureté et imperméabilité, et il adhère encore mieux aux matériaux de construction.

Les ciments que l'on emploie de préférence dans les constructions hydrauliques sont tirés de Vassy-lèz-Avallon (Yonne), de Pouilly et de Molêmes.

Le ciment de Vassy est celui qui est le meilleur : aussi la plupart des devis le prescrivent-ils pour l'exécution des travaux hydrauliques. Le ciment de Pouilly est noir après son emploi ; celui de Molêmes est le moins estimé.

M. Gariel, successeur de MM. Gariel et Garnier, est propriétaire des

carrières de ciment de Vassy; il fabrique seul dans la localité ce produit précieux, et il l'exploite sur une très-grande échelle. Dans la note suivante, nous allons examiner les propriétés de cette matière et les principales applications qui en ont été faites.

Le ciment de Vassy a été découvert en 1831 dans le hameau de ce nom, commune d'Étaules, près Avallon (Yonne).

On le trouve sous la forme d'une pierre argilo-calcaire de couleur grisâtre, dont la composition chimique est :

Carbonate de chaux.	63,8
Id. de magnésie. . . .	1,5
Id. de fer.	11,6
Silice.	14,0
Alumine.	5,7
Eau et matières organiques. .	3,4
	100,0

Réduit par la calcination dans des fours à chaux ordinaires, il perd à peu près 40 pour 100 de son poids; sa couleur devient jaune terne, et il donne à l'analyse :

Chaux.	56,6
Protoxyde de fer.	13,7
Magnésie.	1,1
Silice.	21,2
Alumine.	6,9
Perte.	0,5
	100,0

Après la calcination, on pulvérise le ciment à l'aide de manéges à meules verticales analogues à ceux employés pour la fabrication de la pouzzolane artificielle (527). On le tamise dans un blutoir à toile en cuivre de 18 fils par centimètre, et on l'enferme dans des barriques goudronnées et garnies de papier à l'intérieur pour en faciliter le transport et en assurer la conservation. En cet état, on peut le conserver pendant plus d'une année sans qu'il ait rien perdu de ses qualités essentielles, pourvu qu'on ait eu soin de le placer dans un lieu bien sec et hors de contact avec le sol.

Le ciment de Vassy contracte par la compression dans les barriques une certaine adhérence avec lui-même, et d'autant plus grande que le ciment est moins frais. On est quelquefois obligé, pour le retirer des barriques, d'employer des pointes de fer, et il ne reprend pas parfaitement de lui-même son état pulvérulent; il faut assez souvent, pour cela, avoir recours à la truelle du gâcheur. Un résultat analogue se produit par suite d'avaries; mais, dans ce cas, il est encore plus difficile de retirer le ciment des barriques, et sa couleur est devenue blanchâtre. Pour qu'il puisse être réputé non avarié et propre à un bon emploi, il

faut que ses fragments non désagglomérés cèdent facilement sous la pression des doigts et que sa couleur n'ait éprouvé aucune altération.

L'avarie du ciment ayant pour cause principale l'humidité de l'air ambiant, elle se manifeste d'abord au contact des parois de la barrique, puis gagne lentement, mais progressivement, jusqu'au centre; il arrive donc assez souvent qu'une barrique avariée à la surface renferme au centre du ciment très-bon et très-bien conservé.

Le ciment en poudre est très-compressible; il s'affaisse facilement sous son propre poids, surtout si on agite par des chocs le vase qui le contient. Aussi sa pesanteur spécifique est-elle très-variable, comme le fait voir le tableau suivant:

	Densité.
Mesuré très-libre, litre par litre, à la sortie du blutoir.	0,80
Comprimé dans les barriques pour être livré à la consommation.	1,18
Au delà de ce degré de compression, il acquiert avec le temps une force d'expansion suffisante pour briser l'enveloppe.	
On peut par la compression arriver à.	1,50
Dans cet état les barriques se briseraient promptement.	
Retiré des barriques et mesuré immédiatement par petites parties au moment de l'emploi, de nombreuses expériences ont donné.	0,96
Ce dernier chiffre doit être pris pour base de tous les calculs de sous-détails de travaux.	

La quantité de mortier obtenu est à peu près proportionnelle au poids du ciment employé; c'est pour cette raison que le prix de celui-ci est fixé d'après le poids et non sur volume.

Il est d'usage, dans le commerce du ciment, de compter le poids des barriques au même prix que leur contenu.

Le rapport du poids de l'enveloppe au poids total varie de 0,08 à 0,12, suivant la densité et l'épaisseur du bois; soit 0,1 en moyenne.

Le ciment s'emploie sous la forme de mortier, avec ou sans sable, en y ajoutant une quantité d'eau égale à environ la moitié de son volume. La quantité d'eau varie légèrement, suivant la température et d'après le degré d'humidité du sable.

Un mètre cube de ciment en poudre à la densité 0,96, converti en mortier sans mélange de sable, perd 17 pour 100 de son volume et donne seulement $0^{m.c.},83$ de mortier.

On emploie rarement le ciment pur; on le mélange ordinairement avec une certaine quantité de sable dur et purgé de vase et de toute matière terreuse. On obtient par ce moyen un mortier plus résistant, moins exposé à se fendiller à la surface et beaucoup plus économique.

Ordinairement le mortier est composé de volumes apparents égaux de sable et de ciment; mais lorsqu'il doit résister à une forte pression d'eau, il convient d'élever la dose de ciment dans le rapport de 3 pour 2 de sable, et même dans celui de 2 à 1 pour de très-fortes charges d'eau.

2 parties de ciment pour 3 parties de sable donnent encore un très-bon mortier, quoique plus maigre.

Les mortiers en ciment pur ne s'emploient guère que dans les cas qui exigent un durcissement instantané, comme, par exemple, l'étanchement de sources dans les radiers des bassins et écluses ou autres cas analogues.

La prise du mortier de ciment de Vassy gâché à la sortie du blutoir, immédiatement après la fabrication, sans mélange de sable, s'opère en moins d'une minute; l'ouvrier le plus habile n'a pas le temps de l'employer dans de bonnes conditions. Cet intervalle entre le moment du gâchage et celui du durcissement augmente avec l'âge du ciment, l'abaissement de la température et la quantité de sable, surtout si celui-ci est humide, et il peut s'étendre jusqu'à une demi-heure en été et une heure en hiver, sans que le ciment ait rien perdu de ses autres qualités.

Au moment où commence le durcissement, et pendant que s'opère la combinaison, la température du mortier atteint quelquefois 65° quand le ciment est gâché pur.

La résistance du mortier de ciment à la pression a été constatée par l'écrasement de prismes de 0m,16 de longueur, 0m,08 de largeur et 0m,054 d'épaisseur fabriqués depuis deux ans et demi. Dix expériences successives ont donné pour limites supérieure et inférieure de résistance 197 et 121 kilog., et en moyenne 150 kilog. par centimètre carré.

D'autres expériences sur des mortiers de deux mois ont donné pour résistance à la traction 10 kilog. par centimètre carré. Cette résistance augmente notablement avec le temps.

Le mortier de ciment gâché et appliqué convenablement est à peu près imperméable. Cette propriété augmente dans un certain rapport avec l'épaisseur, et diminue au contraire avec une trop forte dose de sable. Un enduit de 5 centimètres d'épaisseur, composé de trois parties de ciment pour deux parties de sable, peut supporter sans déperdition une charge d'eau de 5 à 6 mètres de hauteur.

Les quatre propriétés fondamentales, *résistance à l'écrasement*, *adhérence*, *imperméabilité* et *durcissement rapide* se rencontrent à un haut degré dans le ciment de Vassy, et lui donnent une grande importance dans les constructions de toute nature, et particulièrement dans les grands travaux hydrauliques. On l'emploie :

1° Pour la restauration ou la consolidation de toutes espèces de maçonneries, de moellon, brique ou pierre de taille, quel que soit leur état de dégradation;

2° Pour la construction de voûtes de ponts, d'aqueducs, d'églises, etc., surtout quand ces voûtes doivent satisfaire à des conditions de légèreté et de solidité;

3° Pour enduits de réservoirs, citernes, fosses d'aisances, appartements humides, radiers d'aqueducs ou d'écluses, crépis de murs;

4° Pour travaux à la mer et en rivière, comme rejointoiements, revêtements de

parements dégradés par les vagues, et même pour maçonneries neuves exécutées dans l'intervalle des marées;

5° Pour toute espèce de scellement;

6° Enfin pour rendre hydrauliques les chaux grasses et pour augmenter l'hydraulicité des chaux maigres.

L'emploi du ciment de Vassy exige des soins très-minutieux et des habitudes pratiques longues et soutenues; les ouvriers ordinaires y réussissent d'autant plus difficilement que les procédés de préparation et d'application de cette matière diffèrent davantage de leurs habitudes.

Trois choses essentielles sont à observer dans l'emploi du ciment: 1° la préparation des surfaces sur lesquelles on veut l'appliquer; 2° le gâchage; 3° l'application. Si une seule de ces opérations est manquée, le succès est compromis.

Préparation des surfaces. Les surfaces destinées à recevoir une application de ciment doivent avoir été préalablement nettoyées, et, au besoin, repiquées, pour en ôter toutes les parties altérées et tous les vieux mortiers; les joints doivent être dégradés carrément à la profondeur de 2 ou 3 centimètres, et par un lavage complet on doit en faire disparaître jusqu'aux derniers vestiges de poussière; il faut même, si les surfaces lavées ont eu le temps de sécher, les mouiller de nouveau quelques instants avant l'emploi du ciment. La brique destinée à être employée avec le mortier de ciment doit avoir séjourné dans l'eau pendant un quart d'heure, et en avoir été retirée quelques minutes avant de s'en servir.

Gâchage. Il se fait à la truelle, dans des auges en forme de caisses carrées, à trois côtés relevés ou rebords, le côté ouvert faisant face à l'ouvrier. Le sable et le ciment, dont le volume total peut varier de 1 à 6 litres pour chaque gâchée, selon la nature des travaux, doivent être mêlés à sec dans l'auge, et le mélange disposé en forme de digue pour retenir l'eau, qu'on verse, s'il est possible, en une seule fois sur le ciment, au lieu de jeter le ciment dans l'eau comme on le fait pour le plâtre. On pousse alors rapidement par petites parties avec le bout de la truelle tout le ciment sur l'eau, qui ne tarde pas à être absorbée; puis on agite le tout avec la truelle pour former un mélange préparatoire, et après avoir repoussé toute la pâte d'un côté de l'auge, on la fait passer successivement par petite partie sous le plat de la truelle, afin d'en broyer et triturer jusqu'aux dernières parcelles; on repousse de nouveau la matière vers l'autre côté de l'auge, en ayant soin de relever les bords de la pâte sur le milieu, et on recommence dans le sens opposé à passer le ciment sous le plat de la truelle. Pour un gâcheur très-attentif et très-agile, ces deux opérations peuvent suffire; mais avec des gâcheurs ordinaires, le ciment doit être repassé trois et même quatre fois.

Le gâchage du ciment doit se faire par le travail du poignet et non à

force d'eau. Au premier tour, le mortier présente l'aspect d'une pâte ferme qui se ramollit sensiblement par la trituration ; au dernier tour, il doit avoir la consistance d'une pâte très-molle dont la surface paraît légèrement huileuse.

Pendant les chaleurs de l'été (époque peu favorable à l'emploi du ciment, surtout si on n'est pas à l'abri du soleil), les matériaux étant très-secs, il faut un peu plus d'eau que dans les saisons froides et humides ; ainsi, en temps pluvieux et froids, il convient de gâcher le ciment un peu plus ferme afin d'en hâter la prise, et ce doit être le contraire en été, si l'on veut que le mortier ne prenne pas trop vite ; mais il faut se garder, dans tous les cas, de l'employer liquide.

La saison froide et humide est la plus convenable pour l'emploi du ciment ; les petites gelées même ne sont pas nuisibles si le travail est à l'abri de la pluie. Quand, dans ce dernier cas, l'eau est trop froide, la prise du ciment étant très-lente, on peut y remédier en la faisant tiédir.

L'application du ciment se fait avec la truelle, par jets, à la manière des maçons limosins. On doit proscrire l'emploi de la taloche, et il ne faut lisser la surface du mortier que dans certains cas particuliers, et très-légèrement, comme, par exemple, lorsqu'il s'agit d'enduits de réservoirs. Ce lissage ferme les pores à la surface et complète les soudures : mais il donne lieu à des gerçures quand la dessiccation est trop prompte. Cette opération doit se faire avant que le mortier ait commencé à s'échauffer et à durcir ; dès que la chaleur a commencé à se développer, ou que le mortier devient plus ferme, on n'y doit plus toucher. Toutefois, lorsque le ciment a produit tout son effet et que le durcissement est complet, on peut sans inconvénient, si le coup d'œil l'exige, comme dans les travaux de restauration de maçonnerie de pierre de taille, ou pour des enduits simulant la pierre, dresser les surfaces par un râclage au moyen de la truelle bretée, et même tailler le mortier au ciseau à la manière de la pierre d'appareil.

Le tableau ci-après donne les quantités relatives de sable et ciment pour diverses compositions de mortier.

TABLEAU de la composition du mètre cube de quelques mortiers de ciment romain.

NUMÉROS.	PROPORTIONS EN VOLUME		VOLUME de sable.	POIDS DE CIMENT, déchet compris.	
	de ciment	de sable.		sans tare.	avec tare.
			m. c.	kil.	kil.
1	1	0	0.00	1204	1336
2	3	1	0.35	928	1030
3	2	1	0.46	843	936
4	3	2	0.55	771	856
5	1	1	0.70	651	723
6	2	3	0.84	530	588

Le mortier n° 1, c'est-à-dire celui de ciment pur, est employé exclusivement à l'étanchement des sources et des fuites d'eau; son extrême imperméabilité et sa solidification presque instantanée le rendent très-propre à ces sortes de travaux.

Les mortiers 2, 3 et 4 sont employés pour faire les enduits de fosses, de citernes, de réservoirs, etc., pour lesquels l'adhérence et l'imperméabilité sont les principales conditions à exiger.

Les mortiers 5 et 6 sont ceux dont l'usage est le plus fréquent : on les emploie avec de grands avantages de solidité pour hourder toutes les maçonneries de meulières, de briques, de moellons, etc.; pour faire des rejointoiements de toute nature, des chapes et des enduits de maçonneries neuves ou vieilles; on les emploie également pour la reprise des maçonneries en sous-œuvre et pour la restauration des vieux parements de pierre de taille dégradés par le temps, et en général pour tous les ouvrages couverts ou continuellement exposés aux intempéries de l'atmosphère, auxquelles ils résistent parfaitement.

Les mortiers de ciment dans lesquels les proportions de ciment sont moindres que pour celui n° 6 commencent à être maigres et à perdre graduellement leurs principales qualités, autant sous le rapport de l'adhérence que sous celui de l'imperméabilité.

On obtient également des mortiers très-hydrauliques avec de la chaux grasse à laquelle on ajoute au plus 1/5 de ciment en poudre.

La maison Gariel a déjà exécuté avec le ciment de Vassy, de 1834 à 1854, sur différents points de la France, un grand nombre d'ouvrages importants. Par sa persistance et son esprit de suite, par ses soins constants et soutenus employés à former des ouvriers et chefs d'atelier habiles, par ses essais multipliés et coûteux, elle a doté son pays d'une industrie toute nouvelle et donné à l'État le moyen de conserver, sans en altérer la forme primitive, un grand nombre de constructions hydrauliques ou monumentales dont la ruine faisait de rapides progrès, et dont la restauration par les moyens ordinaires eût été impossible à moins d'y employer des sommes énormes.

Les ouvrages les plus remarquables parmi ceux qu'a exécutés la maison Gariel sont indiqués dans le tableau suivant.

DÉSIGNATION DES OUVRAGES.	DATES de l'exécution.
Restauration d'anciennes constructions, rejointoiements, enduits, reprises de parements, etc.	
Fontaines monumentales de la ville de Paris.	De 1840 à 1848
Pont royal à Paris	1843 à 1844
Pont Marie à Paris	1847 à 1848
Pont de la Tournelle à Paris	1845 à 1846
Pont de Charleville (Ardennes).	1844
Pont de Belle-Fontaine, près Juvisy (Seine-et-Oise).	1843 à 1844
Pont de Decise, sur la Loire.	1846 à 1847
Pont de Montrichard (Indre-et-Loire).	1847
Pont de Sanitas, à Tours.	1850
Pont de Lavaur (Tarn).	1850
Pont de Souillac (Lot).	1853
Pont de Poissy (Seine-et-Oise).	1851 à 1853
Travaux d'art du canal des Ardennes.	1841 à 1848
Travaux d'art du canal de Bourgogne (Côte-d'Or).	1846 à 1847
Canal du Nivernais (Nièvre).	1834 à 1841
Canal du Berry.	»
Canal latéral à la Loire.	»
Canal du Midi.	»
Canal du Rhône au Rhin.	»
Fortifications du Havre.	1846
Façades latérales de l'hôtel du Val-de-Grâce, à Paris.	1846
Fort de Vincennes.	1847
Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports du Havre.	1840
Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports de Honfleur.	1841 à 1848
Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports de Caen.	*Id.*
Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports de Cherbourg.	1845 à 1848
Travaux neufs.	
Une voûte d'un seul berceau servant de toiture à l'usine de Vassy, formée de 3 rangs de briquettes de 0m.027 posées à plat et recouverte d'un enduit. Épaisseur totale, 0m.13; longueur, 47m.35; corde, 16m.66; flèche, 5m.40; surface développée, 980 mètres.	1834
La voûte de l'église des frères de la doctrine chrétienne, à Nantes, de forme ogivale surbaissée et d'un seul berceau, formée de 3 rangs de briques ordinaires posées à plat. Longueur, 32 mètres; portée, 11 mètres; flèche, 4 mètres.	1844
La voûte de l'église de Saint-Germain-du-Puits (Cher).	1850
La voûte de l'église de Bagnères-de-Luchon (Haute-Garonne).	1851
La voûte de la grande salle de l'hôtel de ville de Clermont (Puy-de-Dôme), construite en lave volcanique. Longueur, 25m.80; portée, 10m.40; flèche, 2 mètres; épaisseur à la clef, 0m.12.	1836
La voûte de l'église de Sauvigny, près Avallon (Yonne), formée de 2 rangs de briquettes de Lisle et recouverte d'une chappe. Épaisseur totale, 0m.10; corde, 8 mètres; flèche, 4 mètres; longueur de la nef, 26 mètres.	1837
Les voûtes, formant planchers, des 3 étages du bâtiment des archives départementales de la ville de Lille (Nord); formées d'un rang de briques ordinaires posées de champ, soit 0m.11 d'épaisseur. Flèche, environ 1/10 de la corde. Elles présentent une surface totale de plus de 3000 mètres carrés.	1842

DÉSIGNATION DES OUVRAGES.	DATES de l'exécution.
Les voûtes en voussoirs moulés du bassin couvert de la prise d'eau du canal de l'Ourcq, à la Villette, pour la distribution des eaux dans Paris ; ces voûtes, supportées par des piliers de 0m.40 d'épaisseur, recouvrent une surface de 650 mètres ; elles ont 4 mètres de corde et 0m.35 de flèche.	1844
Les voûtes des canaux de chasse du bassin de la Floride au Havre, sous les fortifications et sous le quai, construites en briques et ciment. Longueur, 50 mètres ; corde, 10 mètres ; flèche, 2 mètres ; épaisseurs à la clef, 0m.54 et 0m.76. . . .	1847
Les voûtes des réservoirs des fontaines d'Avallon, d'Auxerre, de Béziers, de Castelnaudary et de Mers-el-Kéhir (Afrique).	1851 à 1853
La construction totale, en briques et ciment, du grand aqueduc de chasse du port de Honfleur.	1842 à 1848
Tablettes de couronnement des murs d'escarpe des fortifications du Havre, simulant la pierre de taille, sur une longueur de 1000 mètres, exécutées en briques hourdées en ciment et recouvertes d'un enduit..	1847
L'établissement d'une conduite libre de 5 kilomètres de longueur pour l'alimentation des fontaines de la ville d'Avallon (Yonne), avec réservoirs et bâche de prise d'eau. La conduite est formée de deux fortes pièces moulées en ciment de Vassy et fragments de moellons, l'une formant la rigole ou caniveau, l'autre une couverte en berceau. Le caniveau est posé à sec sur le sol, qui est très-ferme, et les pièces qui le composent sont jointes et soudées bout à bout avec du ciment de Vassy. Les pièces de la couverte sont posées à joints croisés et soudés de la même manière. La section du vide intérieur est de 0m.08. La conduite traverse la rivière du Cousin sur un arceau, construit en moellons bruts de granit hourdés en mortier de ciment de Vassy, dont la corde est 31 mètres ; la flèche, 3m.10 ; la largeur, 1m.50, et l'épaisseur à la clef, 1 mètre.	1847
Des conduites ou caniveaux du même genre ont été construits dans les forts détachés de Charenton, Nogent, Noisy, Vanves (près Paris), pour l'écoulement des eaux pluviales dans les citernes.	1844 à 1847
Des conduites libres du même genre pour l'alimentation des fontaines des villes d'Auxerre et de Castelnaudary.	1851 à 1853
La reconstruction du pont aux Doubles, sur la Seine, près l'Hôtel-Dieu, à Paris, en une seule arche de 31 mètres de corde, 3m.10 de flèche, 1m.30 d'épaisseur à la clef, et 16 mètres d'une tête à l'autre, en ciment de Vassy et moellon de meulière brute, le tout recouvert d'un enduit de même mortier, simulant un appareil de pierre de taille avec joints et refends.	1847
La reconstruction du Petit-Pont, à Paris.	1853
La reconstruction du pont Notre-Dame, à Paris.	1853
La construction des voûtes du viaduc de Bercy.	1853
La construction d'une arche marinière au pont de Villeneuve-sur-Yonne.	»
La construction, à Paris, de plus de 6000 mètres courants d'égouts en pièces moulées de ciment et meulière, de 0m.11 à 0m.20 d'épaisseur, pieds-droits et voûte.	1840 à 1848
Deux aqueducs construits en sous-œuvre sous le canal de l'Ourcq, sans interruption de la navigation. Ces aqueducs ont 2 mètres	

DÉSIGNATION DES OUVRAGES.	DATES de l'exécution.
de hauteur sous clef; l'épaisseur des pieds-droits est $0^m.30$ et celle de la voûte $0^m.20$. La maçonnerie est entièrement composée de pièces moulées en ciment et fragments de meulière.	1846 à 1848
Enduits en ciment de Vassy.	
Appliqués aux parements des cuves de gazomètres des compagnies française, parisienne, anglaise, pour des hauteurs d'eau de 8 à 12 mètres.	
Aux citernes et fosses d'aisances des forts de Charenton, Nogent, Noisy, Rosny, Romainville, Aubervilliers et Bicêtre (près Paris).	1844 à 1847
Aux réservoirs des eaux de la ville de Paris.	1841 à 1846
A ceux des villes d'Avallon, Auxerre, Nevers et Castelnaudary.	1853
Sur les radiers de plus de 15 000 mètres d'égouts dans Paris	1840 à 1848
Sur le radier du grand aqueduc latéral au bassin neuf du port de Caen.	1845
Sur le radier du barrage éclusé de la Monnaie, à Paris.	1853

530. *Sables et mortiers.* Les sables employés à la fabrication des mortiers doivent être non terreux et entièrement dépourvus de matières animales, lesquelles formeraient avec la chaux un savon soluble qui retarderait la solidification des mortiers. Ils doivent être rudes au toucher, et crier dans les mains lorsqu'on les prend.

On reconnaît si les sables sont bien propres en les remuant dans de l'eau; si celle-ci reste limpide, c'est que le sable est pur et très-bon; si au contraire elle devient bourbeuse, c'est que le sable est terreux.

Généralement on préfère les sables de rivières à ceux de carrières; on est plus sûr d'y rencontrer toutes les qualités des bons sables.

On distingue plusieurs sortes de sables employées à la fabrication des mortiers :

1° Le sable calcaire, qui est formé de particules calcaires mélangées de grains de quartz ;
2° Le sable quartzeux, qui ne contient que des particules de quartz ;
3° Le sable micacé, qui est formé de débris de granit contenant de la silice et de l'alumine ;
4° La pouzzolane (520) ;
5° Les arènes, qui sont composées de sable en grains et d'argile.

Quoique, à l'exception des arènes, ces différentes sortes de sables n'exercent à froid aucune action chimique sur la chaux, leur influence sur la dureté des mortiers est sensible, mais non au même degré pour toutes les espèces de chaux.

Les molécules de chaux grasse ayant entre elles plus de cohésion

qu'elles n'ont d'adhérence avec le sable, il en résulte que le sable qu'on ajoute à cette chaux devrait diminuer la dureté que seule elle est susceptible d'acquérir; mais comme d'un autre côté le sable facilite la pénétration de l'acide carbonique, et par suite le durcissement du mortier, tout en diminuant considérablement la quantité de chaux employée, il en résulte que son concours est très-avantageux.

Les arènes, et même l'argile crue, mêlées à la chaux grasse dans les proportions d'une partie de chaux pour quatre parties d'arènes ou d'argile, donnent une pâte légèrement hydraulique; ainsi, en peu de jours, le mélange acquiert la consistance d'une pâte ferme insoluble, mais qui ne durcit pas davantage. On ne peut attribuer la qualité hydraulique de la pâte qu'à l'action que la silice de l'argile exerce sur la chaux, et le peu de dureté qu'elle acquiert qu'à ce que l'alumine n'ayant pas été torréfiée et durcie, elle empêche la masse de prendre toute la dureté que devrait lui communiquer le silicate.

Dans les pays volcaniques, on trouve, outre les sables précédents, une pouzzolane naturelle qui jouit d'une grande énergie. De même que les ciments hydrauliques, elle est un produit du feu. Sa composition comprend les mêmes éléments que la pouzzolane artificielle (527), et quoiqu'elle ait été soumise à une température de beaucoup supérieure au premier degré de cuisson de la brique, lequel est le plus favorable aux pouzzolanes artificielles, elle n'en jouit pas moins du même degré d'énergie. On ne peut attribuer cette différence de se comporter qu'à la décomposition qui s'est opérée depuis longues années, et qui a ramené les pouzzolanes naturelles à l'état des pouzzolanes artificielles les plus cuites.

Dans quelques localités, dans le département de l'Aisne, par exemple, on trouve des grès noirâtres, très-friables et d'un aspect terreux, qui jouissent, avec la chaux, des propriétés de la pouzzolane.

Voici, d'après les expériences de M. Vicat, l'ordre dans lequel on doit classer les sables éminemment siliceux, quant à leur convenance pour différentes chaux qui doivent être exposées à l'air.

Pour les chaux éminemment hydrauliques : 1[er] le sable fin ; 2[e] le sable à grains inégaux, provenant du mélange, soit du gros sable avec le fin, soit de celui-ci avec le gravier ; 3[e] le gros sable.

Pour les chaux communes grasses et très-grasses : 1[er] le gros sable ; 2[e] les sables mêlés ; 3[e] le sable fin.

Les chaux qui ont fourni ces résultats avaient été éteintes par immersion (524); mais il est probable qu'on y arriverait également par les autres modes d'extinction.

Il n'y a que des expériences directes qui peuvent prescrire les proportions de sable et de chaux qui doivent entrer dans un mortier; elles varient de 1,5 à 3 parties de sable pour une partie de chaux. Jamais le volume de chaux ne doit être moindre que celui des vides que laissent

entre eux les grains de sable; le volume du mortier est alors à peu près égal à celui du sable, excepté cependant dans le cas où les molécules de chaux seraient assez volumineuses pour s'interposer entre les grains de sable et en empêcher le contact.

Le volume des vides laissés entre les grains de sable se détermine en remplissant de ce sable, préalablement desséché, une mesure de capacité déterminée, et à verser dessus une quantité d'eau suffisante pour qu'elle effleure la surface du sable ; le volume d'eau versé est égal à celui des vides.

En opérant ainsi, on trouve que pour les sables de rivières le volume d'eau employé varie généralement de 31 à 34 pour 100 de sable, vide compris.

D'après M. Raucourt (*Traité de l'art de faire de bons mortiers*), pour les débris de pierres ou cailloux de 0m,027 à 0,04 de diamètre, tels que ceux que l'on mêle au mortier pour la fabrication du béton, il faut, pour un volume de pierre, un demi-volume d'eau et plus, à quelques variations près ; pour des sables ou graviers de 0m,011 à 0m,014 de diamètre, il faut un demi-volume d'eau; pour des sables gros de 0m,002 à 0m,0045 de diamètre, cinq douzièmes de volume; pour des sables moyens de 0m,001 de diamètre, deux cinquièmes de volume ; pour les sables fins de 0m,00025 de diamètre, un tiers de volume, et pour les sablons et les terres, deux septièmes de volume.

Proportions pour les sables mêlés, d'après le même auteur.

COMPOSITION A PRÉFÉRER.			VOLUME de sable.	VOLUME de chaux ou ciment.	OBSERVATIONS.
Béton ou mortier mêlé de cailloux.	Cailloux. . . . . Gros sable. . 1 Sable moyen. 2 Sable fin. . . 4	20 7	27	6 + (*)	(*) Plus une addition de chaux égale à la moitié de l'augmentation du volume du mélange. Avec les sables fins, si le volume du mélange augmente, on ajoute un volume de chaux égal à celui de l'augmentation.
Mortier de gravier.	Gravier. . . . 20 Sable moyen. 2 Sable fin. . . 4	. . .	26	6 + (*)	
Mortier de gros sable.	Gros sable. . 20 Sable fin. . . 5	. . .	25	7	
Mortier de sable moyen.	Sable moyen. 20 Sable fin. . . 5	. . .	25	7	

Il n'y a non plus que des expériences directes qui peuvent donner les proportions de chaux et de sable, ciment ou pouzzolane qui doivent entrer dans la composition pour obtenir le degré d'hydraulicité ou d'énergie voulue.

Pour des massifs en maçonnerie qui ne doivent être exposés à une action destructive ou à une charge considérable qu'à une époque éloignée, on peut employer un mortier non très-hydraulique; on l'obtient avec de la chaux hydraulique faible et du sable, ou avec de la chaux énergique mélangée avec de la chaux grasse et du sable, ou encore avec de la chaux grasse et du ciment ordinaire. Si au contraire les mortiers peuvent être soumis à des chances de dégradation presque au moment de leur emploi, ils doivent être très-énergiques, et alors ils se font avec de la chaux énergique et du sable, ou avec de la chaux grasse ou faiblement hydraulique et du ciment hydraulique. Dans tous les cas, il est possible de proportionner l'énergie du mortier pour satisfaire aux conditions exigées.

M. Laroque, constructeur attaché à l'exploitation des ciments de Vassy (529), nous communique, comme fournissant de bons mortiers, les proportions du tableau suivant, données pour un mètre cube de mortier.

CHAUX.	VOLUME				OBSERVATIONS.
	de chaux.	de sable.	de ciment de tuileaux.	de pouzzolane.	
	éteinte par fusion.	de rivière.			
	m. cu.	m. cu.	m. cu.	m. cu.	
Grasse (non hydraulique). . .	0.370	0 950	»	»	Murs de clôture, fondation de bâtiments.
Id. (un peu hydraulique).	0.340	»	0.820	»	Pavage des cours.
Id. *id.*	0.250	0.940	»	0.200	Réservoirs, etc.
Hydraulique (très-énergique).	0.360	1.000	»	0.040	Travaux dans l'eau.
Id. (énergie ordin.)..	0.333	1.020	»	»	Service des eaux et égouts de la ville de Paris, pour les constructions hydrauliques (*).
Id. *id.*	0.370	0.950	»	»	Service de la navigation et des ponts de Paris.
		de plaine.			
Id. *id.*	0.380	1.020	»	»	Maçonnerie du fort de Charenton.
	par immersion.				
Id. *id.*	0.440	1.000	»	»	Pour andoit, *id.*
Id. (très-maigre). .	0.100	1.000	»	»	Les $0^{mc}.100$ de chaux sont amenées au volume de lait de chaux de $0^{m}.340$ (**).

(*) Les maçonneries des réservoirs recevant les eaux du puits de Grenelle, situés place de l'Estrapade, sont hourdées avec ce mortier, ainsi que toutes celles faites pour les travaux des eaux et égouts de la ville de Paris.

(**) Ce mortier est employé avec avantage, sur une épaisseur de $0^{m}.30$ à $0^{m}.40$, dans le fond d'une fondation sur un sol douteux. Le réservoir d'eau situé rue des Amandiers repose sur une couche de $0^{m},50$ de ce mortier, qui finit par prendre beaucoup de consistance.

531. *Fabrication du mortier*. Les proportions de chaux et de sable étant déterminées, on fait le dosage à l'aide de brouettes d'une capacité déterminée de 5 à 8 centièmes de mètre cube. On procède alors à la manipulation, qui se fait à bras d'hommes dans les petits chantiers et mécaniquement pour les grands travaux.

Manipulation à bras. Sur une aire faite en planches, afin que la terre ne se mélange pas au mortier, on étale environ 3 brouettes de sable en forme de bassin circulaire, dans lequel on verse la quantité convenable de chaux en pâte, quantité qui forme ordinairement une brouettée. On procède alors au mélange du sable et de la chaux à l'aide d'un rabot que l'on pousse en le tenant à plat pour écraser les masses, et que l'on tire en le mettant sur le tranchant pour soulever la matière et tirer toujours un peu de sable du bassin sur la partie ramollie. Un manœuvre relève la matière en tas au fur et à mesure que l'autre l'étale avec le rabot.

Il arrive quelquefois que la chaux, surtout la chaux hydraulique, est trop raffermie et le sable trop sec pour permettre un mélange facile. Dans ce cas, on la ramollit avec des pilons avant de se servir des rabots, ou on jette dessus une certaine quantité d'eau. Le premier moyen est préférable; mais comme il est dispendieux, on emploie souvent le second, dont on peut atténuer les inconvénients en substituant à l'eau un lait de chaux.

Manipulation mécanique. Elle se fait le plus souvent à l'aide d'un manége à trois roues, mû par deux chevaux, et dont nous avons donné les principales dimensions au sujet de la chaux hydraulique artificielle (522).

Pour se servir d'une telle machine, on place dans toute l'étendue de l'auget la chaux nécessaire à une bassinée; on fait faire quelques tours aux roues, afin de la bien ramollir, et alors, sans arrêter le manége, on jette à la pelle, au fur et à mesure que le mélange s'opère, la quantité de sable convenable. Pendant que le mélange se termine, on accumule autour de l'auget la chaux et le sable pour la bassinée suivante. Un râcloir en fer, qui épouse la forme de l'auget, ramène au fond de cet auget la matière que les roues font monter contre ses parois. Le râcloir est fixé à une tige horizontale et supporté par deux roues de $0^m,30$ de diamètre qui marchent sur deux rails en fer fixés à $0^m,10$ du bord de l'auget. Une vanne en bois convenablement fixée au manége fait tomber le mortier dans un trou disposé pour le recevoir, en le faisant passer par une soupape que l'on ouvre dans le fond de l'auget.

On peut faire $0^{mc},30$ de mortier par bassinée, dont le broyage est terminé en 22 minutes. Dans un travail journalier de 10 heures, on peut donc fabriquer $24^{mc},60$ de mortier par manége.

On fabrique aussi mécaniquement le mortier à l'aide de tonneaux en bois de chêne d'environ $1^m,30$ de hauteur et $1^m,10$ de diamètre, légèrement évasés par le haut, fermés par le bas et portant latéralement, à leur

partie inférieure, une ouverture qui se ferme à volonté avec une porte à coulisse et qui sert à l'écoulement du mortier. Aux parois intérieures du tonneau, à différentes hauteurs, sont fixés des croisillons en fonte tranchants armés de dents en fer. Un arbre vertical placé dans l'axe du tonneau porte trois croisillons armés de dents qui se croisent avec les premières. Ces tonneaux, imaginés par M. Bernard, inspecteur des ponts et chaussées, ont été employés avec avantage au port de Toulon.

M. Roger, architecte, a apporté deux modifications importantes aux tonneaux de M. Bernard : la première consiste en ce que le mortier s'écoule non-seulement par une porte latérale, mais aussi par des ouvertures pratiquées dans le fond du tonneau, ce qui facilite la vidange; la seconde, en ce que l'arbre vertical porte des disques en fonte qui écrasent le mortier contre le fond du tonneau.

Au simple mélange des tonneaux de M. Bernard ceux de M. Roger ajoutent le broiement; aussi ces derniers fournissent-ils des mortiers supérieurs, surtout lorsque le sable est argileux.

M. Roger construit des tonneaux de toutes grandeurs : il y en a qui sont manœuvrés par un seul homme, d'autres par deux ou par quatre, et il y en a qui le sont par un cheval et même par deux.

532. *Prix de revient de la fabrication du mortier.*

1° *Au rabot*, on peut établir le prix de revient du mètre cube d'après les données suivantes :

L'établissement du plancher sur le sol, et l'intérêt du prix et l'entretien des brouettes de mesure, des seaux, etc., peuvent être estimés à 20 fr. par année.

Un rabot coûte 5 fr.; il peut servir à fabriquer 300 mètres cubes de mortier dans une année, et l'intérêt du prix d'achat et l'entretien peuvent être évalués à 5 fr. pour une année.

Un chef d'atelier peut surveiller quatre équipages composés chacun de cinq garçons, y compris les manœuvres qui approchent les matières.

Un chef d'atelier est supposé payé 6 fr. par jour et les garçons 2 fr. 50 c.

Sous-détail de la fabrication d'un mètre cube de mortier :

	fr.
$9^h,00$ d'ouvrier à 2 fr. 50 c. pour 10 heures	2,25
$0^h,25$ de chef d'atelier à 6 fr. pour 10 heures.	0,15
Frais d'outils.	0,13
Total.	2,53

2° *Fabrication avec le manége.* L'établissement du manége revient à environ 440 fr. Pour les établissements successifs du même manége en divers lieux, on peut compter sur 170 fr. de dépense chaque fois.

Supposant que le manége n'ait servi qu'une campagne dans un seul emplacement, l'intérêt du prix d'établissement sera de $0^f,11$ par jour de travail, en supposant deux cents jours de travail.

Comptant sur 45 fr. pour l'entretien annuel des brouettes, seaux, etc., cela fera par jour de travail $0^f,225$.

Pour le service de la machine, il faut, par journée de travail :

	fr.
2 chevaux à 5 fr.	10,00
1 conducteur à 3 fr.	3,00
6 garçons à 2 fr. 50 c.	15,00
1 heure de chef d'atelier à 6 fr.	0,60
Entretien du manége.	1,20
Total.	29,80

Admettant que le manége dure huit ans, après lesquels la valeur intrinsèque des matériaux soit de 100 fr., la perte totale sur le manége sera de 340 fr., ce qui fait 42f.50 par an, ou 0f.21 par journée de travail.

La dépense journalière occasionnée par le manége sera donc de 0,11 + 0,23 + 29,80 + 0,21 = 30f,35.

Le prix de chacun des 24mc,60 de mortier fabriqués par journée de travail sera donc de 1f,24.

3° *Fabrication avec un tonneau Roger.* Un de ces tonneaux coûte 1005 fr., 8 hommes en font le service et fabriquent 25 mètres cubes de mortier en 10 heures de travail, ou 5000 mètres cubes en 200 jours de travail dans l'année.

L'entretien annuel ne dépasse pas 200 fr.

Admettant que le tonneau dure dix ans, après lesquels les débris valent 100 fr., la perte annuelle sera de 90f.50.

On peut, comme dans le cas précédent, compter 45 fr. pour l'entretien annuel des brouettes, seaux, etc.

Les trois dépenses annuelles précédentes, plus l'intérêt, font un total de 385,75 ; ce qui fait, pour les frais d'outils, par mètre cube de mortier, 0f,08.

Sous-détail par mètre cube de mortier :

1° Avec des hommes :

	fr.
3h,2 d'ouvrier à 2 fr. 50 c.	0,80
0h,2 de chef d'atelier à 6 fr.	0,12
Frais d'outils.	0,08
Total.	1,00

2° Avec un cheval :

	fr.
0h,40 de cheval et de conducteur à 8 fr.	0,32
1h,6 de garçons à 2 fr. 50 c.	0,40
0h,20 de chef d'atelier à 6 fr.	0.12
Frais d'outils.	0,08
Total.	0,92

533. *L'eau employée pour l'extinction des chaux* (524), *et en général pour la fabrication des mortiers*, doit, autant que possible, être très-

pure. On ne doit faire usage des eaux de mer et de toutes celles qui sont saumâtres qu'autant que l'on est assuré par l'expérience qu'elles fournissent de bons mortiers.

L'emploi de l'eau de mer est presque toujours défendu pour la fabrication des mortiers; mais ce principe ne doit pas cependant être général. Le mortier fabriqué avec cette eau a une dessiccation très-lente, et il produit pendant assez longtemps, à la surface des maçonneries, des efflorescences salines qui doivent faire supprimer son emploi dans la construction des maisons d'habitation, mais qui sont sans importance pour des murs de quais et des constructions analogues.

534. *Béton*. C'est un mélange de mortier hydraulique et de pierres cassées de 3 à 4 centimètres de côté, dans des proportions qui dépendent des vides existant entre les pierres, et de la dureté et de l'énergie de prise dont on a besoin pour le travail à exécuter. On dit que le béton est *gras* ou *maigre*, selon que la proportion de mortier est grande ou faible.

Le volume des vides existant entre les pierres se détermine comme pour le sable (530), en versant sur les pierres sèches, placées dans un vase de capacité connue, autant d'eau qu'il est possible; le volume d'eau versé est égal à celui des vides.

De plusieurs expériences faites de cette manière, il résulte que dans un mètre cube apparent de cailloux mêlés, de diverses grosseurs mais ne dépassant pas $0^{m},05$ dans aucun sens, semblables à ceux dont on se sert à Paris, le vide est de $0^{m.c.},38$, et que pour les pierres cassées et les cailloux de grosseur à peu près uniforme et ne dépassant pas $0^{m},05$, il est de $0^{m.c.},46$.

Pour obtenir un béton dont les vides des cailloux soient bien remplis, le volume du mortier doit dépasser celui des vides; il doit être au moins de 1/4 plus grand : ainsi, selon que le volume des vides sera de $0^{m.c.},38$ ou de $0^{m.c.},46$, celui du mortier employé devra être au moins de $0^{m.c.},48$ ou de $0^{m.c.},58$ pour obtenir un béton plein propre à la construction des massifs de fondations qui doivent résister à la pression de l'eau.

Lorsque le béton n'est pas destiné à résister à la pression de l'eau, quand, par exemple, il est employé à la construction de fondations qui se trouvent au-dessus de la masse d'eau, il n'y a pas nécessité qu'il soit imperméable; il suffit qu'il soit incompressible et qu'il résiste à la rupture, et alors le volume du mortier peut être égal et même quelquefois inférieur à celui des vides des cailloux ou des pierres cassées.

TABLEAU des proportions de mortier et de cailloux mêlés, de diverses grosseurs, mais inférieures à $0^m,05$, *par mètre cube de quelques bétons.*

DÉSIGNATION.	MORTIER.	CAILLOUX.	OBSERVATIONS.
	m. c.	m. c.	
Béton gras.	0.55	0.77	Pour radiers, réservoirs, etc., soumis à une pression d'eau considérable.
Id. ordinaire. . . .	0.52	0.78	Pour les ouvrages de maçonnerie des eaux et égouts de la ville de Paris.
Id. *id.*	0.48	0.84	Pour les travaux de navigation dans Paris, fondations de piles de ponts, de murs de quais, etc.
Id. un peu maigre.	0.45	0.90	Pour fondations d'édifices sur terrains humides et mouvants.
Id. maigre.	0.38	1.00	Massifs, fondations, etc., sur terrains secs et mouvants.
Id. très-maigre. .	0.20	1.00	

Pour des pierres cassées ou des cailloux de grosseur uniforme, on ajouterait au volume de mortier du tableau précédent l'augmentation de volume des vides.

Le dosage des matières se fait, comme pour le mortier (531), à l'aide de brouettes de 5 à 8 centièmes de mètre cube.

Le béton se fabrique à bras d'hommes à l'aide d'une griffe à trois dents ou avec des machines.

Pour fabriquer le béton avec la griffe, on commence par étaler sur une aire en planches une brouettée de cailloux; dessus on stratifie la quantité proportionnelle de mortier, puis une ou deux brouettées de cailloux, puis le mortier et une troisième brouettée de cailloux que l'on recouvre de la quantité convenable de mortier. On a soin de commencer ces stratifications par les couches de cailloux, sans quoi le mortier adhérerait à la plate-forme, et le mélange serait difficile.

Cela fait, on retrousse le tas à la pelle, puis, avec des griffes en fer à trois dents, on l'étale de nouveau; on retrousse la matière, puis on l'étale, et on continue ainsi de suite jusqu'à ce que le mélange soit complet; ce qui a lieu quand les cailloux sont entièrement couverts de mortier.

Détail du temps employé à la fabrication d'un mètre cube de béton :

	h.
Lavage des cailloux.	0,60
Charge, transport et étalage des cailloux et du mortier. .	1,70
Mélange.	5,00
Total.	7,30

Sous-détail du prix de fabrication du mètre cube de béton (532) :

	fr.
7h,30 d'ouvriers à 2 fr. 50 c. pour 10 heures.	1,82
0h,25 de chef d'atelier à 6 fr.	0,15
Frais d'outils.	0,13
Total.	2,10

Quand on a une grande quantité de béton à fabriquer, il convient de faire usage de machines.

La première machine employée est celle dite à coffres. Elle se compose de dix coffres, et sa manœuvre exige de dix à six ouvriers, suivant que l'on veut accélérer plus ou moins le travail.

Les dix coffres étant en fonte et ayant les dimensions indiquées par la fig. 1, pl. III, qui en représente deux tout montés en élévation et en plan, la machine coûte environ 550 fr. de premier établissement.

On peut admettre qu'elle durerait au moins trois ans, et qu'alors elle vaudrait 50 fr.; de sorte que la perte serait de 500 fr., ce qui fait 166f,67 par an.

L'établissement d'une plate-forme à chaque extrémité de la machine, l'intérêt du prix d'achat des brouettes, seaux, etc., et leur entretien peuvent être évalués à 80 fr. par an.

Ajoutant à ces deux sommes 300 fr. par an pour l'entretien et les frais de déplacement de la machine, ainsi que 27f,50 pour l'intérêt du prix d'achat, on voit que les frais d'outils s'élèvent par année à 574f.17.

Avec 10 hommes pour faire fonctionner la machine, on peut fabriquer moyennement 35 mètres cubes de béton par journée de 10 heures de travail. Supposant que la machine fonctionne 150 jours par année, elle fabriquera donc 5250 mètres cubes de béton.

Aux réservoirs de la rue de la Vieille-Estrapade, le nombre d'heures d'ouvriers employé à la fabrication d'un mètre cube de béton s'est divisé comme il suit:

	h.
Lavage des cailloux.	0,60
Dosage et approchage des cailloux et du mortier.	2,00
Étendage des cailloux et du mortier, et les placer dans les coffres.	0,86
Service de la machine.	2,86
Enlèvement du béton.	0,60
Total.	6,92

Sous-détail du prix de fabrication du mètre cube de béton :

	fr.
6h,92 d'ouvrier à 2 fr. 50 pour 10 heures.	1,73
0h,14 de chef d'atelier à 6 fr. pour 10 heures.	0,08
Frais d'outils, 574f.17 pour 5250 mètres cubes de béton. .	0,11
Total.	1,92

Au port d'Alger, on a fabriqué le béton avec un *couloir à béton.* C'est une caisse rectangulaire en bois de 1 mètre sur 0m,80 de section et de 2m,50 de hauteur. Elle porte à la partie inférieure une ouverture latérale de 1 mètre de largeur sur 0m,60 de hauteur, par laquelle sort le béton. A la partie supérieure sur la large face de la caisse se trouve un plan incliné en bois doublé de tôle, sur lequel on place les matières à mélanger. lesquelles, en quittant ce plan, tombent sur un deuxième plan incliné fixé au milieu de la caisse contre la paroi opposée, puis sur un troisième plan dont le bas repose sur le seuil de l'ouverture latérale de la caisse, de manière à y amener la matière mélangée.

Une telle machine, y compris un léger échafaudage ou une rampe pour élever les matières, peut être estimée 150 fr.

En supposant que cet appareil fonctionne 150 jours dans l'année, il pourra fabriquer annuellement 9000 mètres cubes de béton.

Supposant que cette machine a éprouvé à la fin de la campagne une perte de valeur de 100 fr. y compris les réparations, ajoutant à cette somme 7f,50 pour l'intérêt du prix d'établissement, plus 100 fr. pour les plates-formes destinées à préparer les matières et à recevoir le béton à la sortie de la machine, pour l'intérêt du prix d'achat des brouettes, seaux, etc., et pour leur entretien, on aura une somme de 207f,50 pour les frais d'outils; ce qui fait 0f,024 par mètre cube de béton.

Nombre d'heures d'ouvriers employé à la fabrication d'un mètre cube de béton :

	h.
Lavage des cailloux	0,60
Dosage et approchage des cailloux et du mortier	2,00
Pour jeter et étendre ces matières sur le plan incliné du couloir	0,86
Pour débarrasser le couloir du béton fait	0,60
Total	4,06

Sous-détail du prix de fabrication d'un mètre cube de béton :

	fr.
4h,06 d'ouvriers à 2 fr. 50 pour 10 heures	1,015
0h,17 de chef d'atelier à 6 fr. pour 10 heures	0,102
Frais d'outils	0,024
Total	1,141

535. *Mortiers employés à la mer.* Les travaux à la mer qui ont résisté depuis longues années et qui se trouvent dans un bon état de conservation ont été établis avec des mortiers de pouzzolanes naturelles énergiques unies aux chaux hydrauliques. Dans ces derniers temps, et dans des vues d'économie, on a fait usage de mortiers diversement composés de chaux grasses, de pouzzolanes artificielles et de sables; mais un grand nombre de ces mortiers se sont ramollis après un temps plus ou

moins long, et il y a lieu de craindre que les autres n'entraînent également la ruine des travaux dans lesquels ils entrent. Quelques combinaisons permettent cependant d'espérer beaucoup; ainsi, à Saint-Malo, M. l'ingénieur Féburier a employé avec succès, depuis plusieurs années, un simple mortier de sable de grève et d'une chaux artificielle de deuxième cuisson d'une grande énergie. A Cherbourg, à Brest et sur d'autres points, on a obtenu, avec un ciment artificiel de première cuisson, composé de craie et d'argile, et connu sous le nom de ciment de Portland, des résultats qui paraissent laisser bien loin en arrière tout ce qu'on pourrait obtenir des pouzzolanes d'Italie et des bords du Rhin.

Les eaux de la Méditerranée paraissent posséder à un moins haut degré les causes de destruction des mortiers que celles de l'Océan et de la Manche : cela est dû sans doute à leur composition, qui paraît être un peu différente, à leur température plus élevée de 4 à 6 degrés, et à leurs courants 4 fois moins rapides sur les côtes.

MAÇONNERIES.

536. Dans les chantiers de maçonnerie on distingue (*Art*, nos 1 à 9).

1° Les *garçons*. Ce sont les ouvriers destinés à la manœuvre des matériaux sur les ateliers ; c'est par là que commencent les apprentis maçons ;

2° Les *maîtres garçons*. Ce sont des garçons qui ont fait preuve d'intelligence et de zèle, et que les chefs d'ateliers choisissent comme aides pour les remplacer dans diverses circonstances. Quand un maçon passe chef d'atelier, il choisit ordinairement son garçon pour en faire son maître garçon ;

3° Les *maçons limosins*. Ce sont les garçons ou maîtres garçons qui se sont mis à faire toutes les maçonneries en moellons, meulières, etc., ainsi que les rejointoiements, les rocaillages, les crépis et les enduits grossiers ;

4° Les *maçons à plâtre*. Ce sont ceux qui, dans les localités comme Paris, où on fait un très-grand usage de plâtre, terminent les bâtiments élevés par les maçons limosins. Ils font tous les travaux de plâtrerie désignés plus particulièrement sous le nom de *légers ouvrages;*

5° Le *maître compagnon* ou *chef d'atelier*. C'est l'employé chargé de diriger tous les maçons et garçons d'un même chantier ;

6° Le *commis* ou *conducteur de travaux*. C'est l'employé chargé de conseiller plusieurs maîtres compagnons et appareilleurs (541), et d'en surveiller les ateliers ;

7° Le *tâcheron*. C'est un ouvrier ou un employé auquel un entrepreneur cède une partie de son entreprise, ordinairement de main-d'œuvre seulement.

537. On donne le nom de *maçonnerie* à un ouvrage quelconque composé de pierres naturelles ou artificielles plus ou moins grosses reliées par du mortier, du plâtre, de la terre, ou simplement posées à sec en liaison les unes avec les autres. Il y a aussi la maçonnerie de *pisé*, qui est faite en terre desséchée sur place.

La maçonnerie de pierre se fait en pierre de taille, en moellons, en briques, etc., posés par assises régulières ou irrégulières.

Dans la maçonnerie de moellons à assises régulières, on distingue celle où les moellons sont posés bruts, ce qui donne la maçonnerie dite *limosinage* (on se contente d'aligner le parement du mur au cordeau, et de faire quelquefois sauter avec le marteau les aspérités qui rendent par trop irrégulières les faces horizontales et la face apparente des moellons), et celle où on a donné préalablement aux moellons une épaisseur régulière dans chaque assise; quand cette dernière maçonnerie est très-soignée, la hauteur est uniforme pour toutes les assises ainsi que la largeur des pierres.

La maçonnerie de moellons à assises irrégulières peut se faire en posant les moellons à la main et de manière à parementer le mur, elle prend encore alors le nom de *limosinage*; ou sans même prendre cette précaution, ce que l'on fait généralement pour les fondations et pour les doubles murs adossés à un terre-plein, dans ce cas elle prend le nom de *maçonnerie de blocage*. On appelle aussi blocage le remplissage en éclats de pierre que l'on fait à l'intérieur des murs, entre les pierres ou moellons taillés qui forment les parements, et que l'on place à bain de mortier. La maçonnerie de blocage est d'autant meilleure que l'on proportionne mieux les dimensions des pierres à celles des espaces qu'elles doivent remplir, et qu'elles sont mieux enveloppées d'une couche de mortier sur toute leur surface. Dans la maçonnerie de moellons à assises irrégulières, on peut ranger celle formée de pierres cassées jetées sans précaution, pêle-mêle avec le mortier; c'est la *maçonnerie de béton* (534).

538. *Maçonnerie de pisé.* On ne l'emploie que pour les constructions de peu d'importance, telles que les bâtiments ruraux, et seulement dans les localités où la pierre est rare; encore ne doit-on l'établir que sur un socle en pierre s'élevant jusqu'au-dessus du sol.

La terre à briques est la plus convenable pour faire le pisé; on y mélange, en la pétrissant, de la paille ou du foin pour l'empêcher de se fissurer quand elle se dessèche. La terre sablonneuse, sans liant, est impropre à la confection de cette maçonnerie.

Les murs en pisé se font en posant simplement le mélange de terre et de paille avec une fourche qui sert aussi à dresser les parements du mur, dont la position est déterminée par des cordeaux tendus. Quand cette maçonnerie doit être faite avec plus de soin, on emploie deux planches maintenues à une distance égale à l'épaisseur du mur. Entre ces planches, que l'on place dans les parements du mur, on tasse la terre par couches, à l'aide de battoirs ou de pilons. Quand cette espèce de coffre est remplie, on fait sauter les clavettes qui relient ses parois aux traverses qui en règlent l'écartement, on retire ces traverses et on place le coffre en un autre point du mur. Les trous laissés dans le mur par les traverses du coffre se remplissent avec de la terre. En serrant de plus en plus les clavettes des traverses, à mesure que le mur s'élève,

on donne le fruit convenable à cette espèce de maçonnerie; ce fruit est ordinairement de 7 à 8 millimètres par mètre de hauteur pour chaque face. Il est évident que ce genre de maçonnerie ne peut être employé que pour des constructions peu élevées et non chargées. On en fait un fréquent usage pour la construction des murs de clôture, qu'il faut avoir soin de couronner d'un paillasson en chaume faisant office de corniche. On charge ce paillasson, afin de le maintenir en place, à l'aide d'une espèce de chaperon en terre, que l'on renouvelle de temps à autre.

Dans la vallée du Rhône, on construit des maisons à plusieurs étages en pisé. On rend les murs solidaires entre eux au moyen de pièces de bois de faible équarrissage reliées entre elles et posées à plat dans les murs de refend et de face. Quelquefois on construit les angles en moellons; mais alors le tassement inégal des différentes parties des murs est une cause grave de destruction. On augmenterait beaucoup la solidité du pisé en plaçant dans l'intérieur des murs, à des hauteurs différentes, des lattes ou des verges disposées horizontalement dans le sens longitudinal.

Un enduit formé d'une partie de chaux pour 4 d'argile et d'une quantité de bourre suffisante pour en parsemer toute la masse rend convenable le pisé pour résister à l'action destructive de l'air et de la pluie. Cet enduit ne doit être appliqué qu'après la dessiccation des murs. Dans le département du Rhône, on a reconnu que des murs de 18 à 20 pouces d'épaisseur, achevés vers le commencement de mai, peuvent recevoir l'enduit à la fin de septembre; que ceux terminés en juillet et même en août peuvent encore être enduits avant l'hiver; mais ceux finis plus tard exigent au moins six mois de dessiccation. Le vernis ne doit pas être appliqué pendant les temps de gelée, et il convient que le temps ne soit ni humide ni pluvieux. Plus le pisé est sec, mieux l'enduit s'y attache.

539. *Maçonnerie de pierre de taille.* On donne le nom de *pierre de taille* aux blocs de pierre qu'un seul homme ne peut ni manier ni porter, et que pour employer on dresse au moins sur les faces apparentes ainsi que sur les *lits*.

Les *libages* sont les gros blocs de pierre que l'on emploie bruts ou grossièrement dressés sur les faces pour la fondation des édifices.

Une pierre doit toujours avoir deux faces normales à la direction de l'effort qu'elle supporte et qu'elle transmet; ainsi dans un mur vertical les faces inférieure et supérieure de chaque pierre de taille ou de chaque libage doivent être horizontales. Ces faces prennent le nom de *lits*, et elles doivent être les mêmes que celles qui forment les lits à la carrière, quand les pierres proviennent de roches stratifiées.

La face apparente d'une pierre, c'est-à-dire son *parement*, doit aussi être dressée; il en est de même des faces latérales, que l'on appelle *joints*, et qui sont toujours perpendiculaires au parement et aux *lits*.

On donne aussi le nom de joint à l'intervalle de 4 à 10 millimètres qui reste entre deux pierres et qui reçoit le plâtre ou le mortier. Les faces sont dressées avec d'autant plus de soin que la construction doit être mieux finie et plus solide.

Dans une construction on donne le nom d'*assise* à une même rangée horizontale de pierres. La *hauteur d'assise* d'une pierre est la distance entre les lits. Dans une construction solide, cette hauteur doit être la même pour toutes les pierres d'une même assise, et si la construction est soignée, elle est la même pour les différentes assises.

La dimension d'une pierre perpendiculairement à son parement, c'est-à-dire la quantité dont elle pénètre dans l'épaisseur du mur, s'appelle *queue* de la pierre. Pour une même assise, la longueur de queue doit être différente pour deux pierres consécutives, afin de bien relier entre eux tous les matériaux d'une même assise. Une pierre plus longue en parement qu'en queue prend le nom de *carreau*. Le rapport entre la longueur du parement et la hauteur d'assise d'un carreau dépend de la dureté de la pierre : pour une pierre tendre, ce rapport ne dépasse pas 2,5 ; pour une pierre dure, il va à 3.5. Une pierre qui est au contraire plus longue en queue qu'en parement prend le nom de *boutisse ;* sa longueur en parement doit toujours être plus grande que sa hauteur d'assise. Quand une pierre s'étend d'un parement à l'autre du mur, on dit qu'elle fait *parpaing*, et elle-même prend le nom de *parpaing*.

Les joints verticaux d'une assise ne doivent pas correspondre avec ceux des deux assises en contact, leurs plans doivent être éloignés de $0^m,15$ à $0^m,20$ au moins.

Il faut éviter avec soin de placer les joints verticaux ou horizontaux dans les angles rentrants ou saillants que peut former le parement d'un mur ; ainsi une pierre formant l'angle de deux murs doit faire partie de ces deux murs, afin de les relier, et s'il y a une retraite horizontale dans le parement d'un mur, il faut éviter qu'elle corresponde à un lit, afin de ne pas avoir un joint dans une partie où l'eau peut couler ou séjourner.

540. *Bossages et vermiculures.* Comme il arrive quelquefois que les pierres *s'épauffrent*, c'est-à-dire s'écornent dans les lits, on a imaginé de prévenir cet inconvénient en refouillant d'avance les lits ; c'est ce que l'on appelle faire des *bossages*. Cette opération ne se fait que dans les soubassements, où les pierres sont le plus sujettes aux épauffrures, dans les murs de soutenement, les piles de ponts, les rez-de-chaussée de certains édifices auxquels on veut donner un aspect de solidité. Quelquefois on ne refouille en bossage que les chaînes saillantes placées de part et d'autre des portes, aux angles des bâtiments, etc.

Pour les pierres sujettes à s'effleurir à l'air, on a imaginé de donner d'avance aux parements des murs à peu près l'aspect qu'ils peuvent prendre avec le temps ; c'est ce que l'on appelle faire des *vermiculures*.

541. *Appareil.* C'est le détail de la disposition des pierres dans un édifice. *Appareiller* est faire d'avance les dessins qui donnent les formes et les dimensions des pierres qui doivent entrer dans l'édifice. On appelle aussi *appareiller*, tracer la besogne aux tailleurs de pierres, d'après les plans d'appareil; l'*appareilleur* est un premier ouvrier chargé de ce tracé et de diriger la pose des pierres et leur raccordement.

542. *Taille de la pierre.* On taille la pierre dans un endroit disposé à cet effet, près de l'édifice à construire, avant de la mettre en place; c'est ce qu'on appelle *taille sur le chantier.* Cependant la taille de quelques parties ne peut se faire qu'après la pose, c'est ce que l'on nomme *taille sur le tas;* les moulures sont dans ce cas; il en est de même du *ravalement*, qui consiste à régulariser les parements. En même temps que l'on fait le ravalement, on exécute le *rejointoiement*, qui consiste à remplir les parties apparentes des joints et des lits avec du mortier.

Pour tailler la pierre, on fait usage de différents outils, dont la forme dépend de la dureté de la pierre, de sa nature et de l'usage auquel on la destine. La pierre calcaire tendre se débite à la scie à dents; elle se taille avec le *ciseau*, la *pioche à pierre tendre*, le *marteau* dit *rustique* et le *marteau tranchant*, et on termine les parements à la *ripe*. La pierre calcaire dure se débite au moyen de la scie sans dent et du sable; elle se taille avec le *têtu*, le *ciseau*, la *gradine*, la *pioche*, le *poinçon*, le *marteau breté*, la *boucharde*, et on termine à la *ripe*. Les marbres et les calcaires très-durs, les granites, les laves, les basaltes, les grès sont taillés à la pointe. On se sert quelquefois, pour tailler les grès, du marteau dit *épinçoir*, que l'on emploie pour fendre les grès, en étonnant la masse par des petits coups de ce marteau frappés dans une direction déterminée, résultat que l'on obtient également avec la pointe.

Dans beaucoup de localités, pour la pierre destinée aux ouvrages hydrauliques, tels que ponts et écluses, on se contente du fini non désagréable que laisse la *boucharde;* à Paris les parements sont *layés* (543).

L'ouvrier, pour tailler sa pierre, amène le parement qu'il dresse sous un angle de 17 degrés environ avec la verticale.

543. *Les outils mis en usage pour la taille de la pierre sont:*

1° Le *têtu*, lourd marteau en fer aciéré, portant une tête carrée d'un côté et une pointe de l'autre, et qui sert pour dégrossir les pierres très-irrégulières et de beaucoup d'*abatage*.

2° Le *ciseau* en fer à tranchant aciéré; quelquefois le tranchant est remplacé par une simple pointe, ce qui donne le *poinçon ;* les *gradines* sont des ciseaux dont le tranchant est dentelé, on en fait usage pour tailler les pierres très-dures;

3° Le *maillet en charme*, de forme variable, servant à frapper sur la tête du ciseau, de la pointe ou de la gradine;

4° La *pioche à pierre dure*, marteau en fer terminé par des pointes aciérées à 4 pans. La *pioche à pierre tendre* a à peu près la même forme que la

précédente ; seulement une des pointes est remplacée par un tranchant de 3 à 4 centimètres de largeur, et l'autre par une *herminette* de même largeur ;

5° Le *marteau bretté* ou *laye* ; c'est un marteau à deux tranchants découpés en dents ; pour les pierres tendres, un tranchant seul est ordinairement bretté. Une pierre dressée au marteau bretté est dite layée ;

6° Le *rustique*, qui est un marteau bretté dont les dents sont beaucoup plus écartées ;

7° La *ripe*, tige en fer que l'ouvrier prend à la main ; elle porte un tranchant à chaque bout, l'un denté et que l'on passe sur la pierre après le marteau bretté, et l'autre uni pour finir la taille ;

8° La *boucharde*, marteau à deux têtes carrées taillées en un grand nombre de têtes de diamant, et dont on frappe à plat les parements dégrossis à la pioche. Sur différents travaux hydrauliques, les parements des pierres sont entièrement terminés à la boucharde fine, avec laquelle on les frappe entre quatre ciselures régulières qui forment les arêtes de la pierre. A Paris, les parements des pierres sont layés, c'est-à-dire passés au marteau bretté, puis finis à la ripe ;

9° *L'épinçoir*, espèce de marteau à deux tranchants non coupants ;

10° L'équerre en fer et les règles.

544. *Bardage, montage et pose de la pierre.* Une fois que la pierre est taillée, on procède à son *bardage*, qui consiste à la transporter au point où elle doit être employée. On emploie à cet effet une voiture à deux roues, appelée *diable* ou *binard*, qui est manœuvrée par des hommes appelés *bardeurs*, aidés quelquefois d'un cheval. Pour les petites pierres, on emploie assez souvent une civière appelée *bard*.

Afin de faciliter la manœuvre de la pierre, le chef bardeur au moins est muni d'une *pince* en fer, dont une extrémité se termine en langue de chat, tandis que l'autre est recourbée et porte un talon.

Une fois le bardage opéré, la pierre se descend sur le *tas* en la faisant glisser sur un plan incliné, au moyen de rouleaux. On modère, si cela est nécessaire, la vitesse à l'aide d'une corde fixée à la pierre et s'enroulant sur un treuil ou un pieu de retenue. On peut aussi employer pour descendre la pierre sur le tas les appareils mis en usage pour l'élever, et qui consistent en une *chèvre* ordinaire, ou en une espèce de *grue*, appelée *sapine*, formée d'un grand arbre en sapin tournant sur pivot et maintenu à la partie supérieure par un collier dans lequel tourne un fort goujon fixé à sa partie supérieure ; des haubans, convenablement disposés et en nombre suffisant, retiennent le collier. Sur plusieurs ateliers on remplace avec assez d'avantage la sapine simple par une autre formée de 4 grandes pièces de bois de sapin scellées fortement dans le sol aux sommets d'un carré.

Pour fixer la pierre au crochet de la mouffle de ces appareils, on emploie une corde sans fin, appelée *élingue* ou *braye*, que l'on dispose autour de la pierre. Crainte que les angles de la pierre ne *s'épauffrent*, on les garnit de petits paillassons aux points où porte l'élingue. Pour les monuments qui réclament une grande netteté de taille de pierre, on remplace l'élingue par un petit instrument en fer, appelé *louve*, qui

se loge dans un trou fait avec soin dans la pierre. On ne peut employer la louve avec des pierres tendres, elle les ferait éclater. Souvent on remplace cet instrument, dont l'usage est assez coûteux, par une simple vis à filets triangulaires, dont la tête porte un anneau. On fait au milieu de la pierre, à l'aide d'un *trépan*, un trou de même diamètre que le noyau de la vis, de sorte qu'en y forçant cette dernière, ses filets pénètrent de toute leur saillie dans les parois du trou.

Une fois les pierres descendues ou montées sur le tas, on les conduit au point qu'elles doivent occuper au moyen de rouleaux en bois, dont le diamètre va en diminuant depuis le milieu jusqu'aux extrémités, afin que l'on puisse facilement changer la direction du mouvement, et que les pierres ne portent pas par les angles. Ces rouleaux ont de 0m,06 à 0m,08 de diamètre sur 0m,60 à 0m,70 de longueur; on les fait rouler sur des madriers en bois placés sur la maçonnerie, laquelle étant fraîche pourrait s'ébranler sans cette précaution.

Pose de la pierre de taille. Lorsque la pierre à poser est approchée à pied d'œuvre, on commence d'abord par la présenter dans la place qu'elle doit occuper, en la faisant reposer sur des cales en bois, et quelquefois en plomb, ayant une épaisseur égale à celle que l'on veut donner au joint de mortier, c'est-à-dire de 4 à 10 millimètres. Ces cales se placent aux angles de la pierre et au moins à 3 ou 4 centimètres des arêtes, afin d'éviter les écornures. Lorsque le poseur s'est ainsi assuré que la pierre a bien toutes les dimensions voulues, il la soulève à la louve, ou lui fait faire quartier sur le côté; puis il nettoie, et arrose si la pierre est tendre et spongieuse, l'assise inférieure et la pierre qu'il pose; il étend sur toute la surface que doit couvrir la pierre une couche de mortier fin, d'une épaisseur un peu plus forte que celle des cales; il met la pierre en place, et il frappe dessus avec un pilon ou un maillet en bois, jusqu'à ce que le mortier *souffle* de toutes parts, et que la pierre repose sur les cales. Il convient d'enlever les cales quand la pierre occupe sa position définitive.

Il arrive très-souvent que l'on pose les pierres de chaînes d'angles et autres, de tablettes de couronnement, etc., en étendant de suite la couche de mortier fin, sans mettre de cales, et en réglant son épaisseur avec la truelle. Pour opérer ainsi, il faut que le mortier soit assez ferme, sans quoi le poids de la pierre le ferait couler, et on obtiendrait des joints d'une épaisseur trop faible et non uniforme, ce qui ne nuirait pas peu à la solidité de la construction.

Dans tous les cas, avant de poser la pierre, il faut s'assurer avec soin que le mortier ne contient aucun gravier dont la grosseur excède l'épaisseur que doit avoir le joint, ce qui obligerait, pour les retirer, de soulever la pierre déjà mise en place et ralentirait l'exécution.

Quelquefois les lits des pierres sont flacheux sur le derrière, c'est-à-dire que la queue se termine plus ou moins en pointe. Pour remédier à

cet inconvénient, on remplit ces flaches avec des éclats de pierre dure que l'on enfonce dans le mortier.

Dans cette pose, l'ouvrier doit autant que possible rendre nul l'effet des petits défauts de la taille des parements ou des lits et joints; il doit apporter une grande attention à éviter les *balèvres*, qui nécessitent ordinairement un ravalement dispendieux. S'il se sert de la pince pour faire abatage, il doit, pour éviter les écornures, placer un bout de latte ou de planche sur le bord des arêtes de la pierre, au point où porte la pince.

Une fois que la pierre est bien en place sur un bon lit de mortier, il ne reste plus pour terminer la pose qu'à remplir les joints montants; ce que l'on fait ordinairement à l'aide de la *fiche* à dents en fer (lame en fer plat denté sur son pourtour).

Un autre moyen de poser la pierre consiste à la placer sur cales, comme il a été indiqué ci-dessus, en ayant toujours soin de nettoyer l'assise inférieure; puis à ficher les joints, c'est-à-dire à les garnir de mortier que l'on y fait pénétrer au moyen d'une *fiche* à dents. Les dents de cet outil pressent le mortier et le font pénétrer sous la pierre; mais comme la pression est proportionnelle à la surface pressante, et qu'elle peut par conséquent être énorme, il arrive parfois que les pierres sont ébranlées; quelquefois aussi il y a impossibilité de faire pénétrer le mortier en tous les points du joint. Malgré ces inconvénients, cette manière d'opérer est fréquente, parce qu'elle est plus facile et plus expéditive que la première, qui doit toujours lui être préférée sous le rapport de la solidité de la maçonnerie. L'emploi de la fiche à dents n'est réellement d'un bon effet que pour les joints montants.

A Paris, et dans presque toutes les localités où l'emploi du plâtre est commun, on fait généralement usage d'un troisième moyen pour poser les pierres, et principalement les pierres tendres. Ce moyen consiste encore à poser les pierres sur cales, comme il a été indiqué ci-dessus, et à les *couler* ensuite, c'est-à-dire à remplir le lit et les joints avec du plâtre gâché très-clair ou coulis (519); on fait même quelquefois du coulis avec du mortier de chaux ou de ciment. Pour faire ce remplissage, on ferme tout le contour des lits et des joints avec du plâtre ou du mortier d'une consistance suffisante, en laissant libre, à la partie supérieure des joints, une petite étendue sur laquelle on fait un godet dans lequel on verse le coulis; on a soin de remuer constamment celui-ci en le versant, afin qu'il reste bien homogène et que l'eau ne s'introduise pas seule dans les joints.

Lorsque les pierres sont posées sur plâtre, la prompte solidification de cette matière oblige d'avoir recours à ce troisième moyen, surtout pour les pierres tendres; on n'aurait pas le temps, avant la prise, de placer convenablement la pierre sur un lit de plâtre d'abord étendu.

Il n'en est pas de même du mortier de chaux, et comme son coulis

fournit toujours de mauvais résultats, il convient de n'en pas faire usage. La quantité d'eau qu'il contient étant absorbée par la pierre, il se forme presque toujours des vides que l'on remplit difficilement, malgré tous les soins que l'on met à le faire au fur et à mesure de cette absorption; et comme de la dessiccation du coulis de mortier de chaux il résulte encore un retrait qui augmente ces vides, il arrive très-souvent que la pierre repose entièrement sur les cales, lesquelles, en pourrissant, occasionnent des tassements considérables dans les maçonneries.

Lorsque la pose de la pierre se fait dans l'eau, il y a impossibilité de faire usage de mortier, qui serait délayé et lavé; alors on se contente de poser simplement les pierres sur cales, qui doivent être en plomb de préférence au bois.

Quand toutes le pierres d'une assise sont posées, il arrive presque toujours que quelques-unes sont plus élevées que les autres; il y a alors nécessité de dresser tout le lit supérieur de l'assise, en enlevant toutes les saillies, avant de poser les pierres de l'assise qui doit la couvrir; sans cette précaution, il est impossible d'obtenir une belle et solide maçonnerie.

Enfin, quand l'ensemble de la maçonnerie est terminé, on procède au *ravalement*, au *ragrément*, et au *rejointoiement* des surfaces apparentes.

TABLEAU du volume de mortier ou de plâtre employé par mètre cube de différentes maçonneries de pierre de taille.

	mèt. cub.
Libages ordinaires.	0,090
Assises ordinaires de $0^m,30$ à $0^m,50$ de hauteur.	0.075
Idem. $0^m,50$ à $0^m,80$ *id.*	0,065
Parpaings et assises de $0^m,25$ à $0^m,30$ d'appareil.	0,080
Claveaux de plates-bandes droites.	0,085
Voûtes en berceau et en arc de cloître.	0,100
Voûtes d'arête et sphériques.	0,105
Marches, seuils et appuis, pour garnissage et coulement.	0,175
Dalles de $0^m,06$ à $0^m,10$ d'épaisseur, $0^m,023$ par mètre superficiel.	0,290

545. *Maçonnerie de moellons.* On distingue, quant à leur nature, trois espèces principales de moellons :

1° Les *moellons de roche* (507), que l'on emploie pour des murs et des massifs qui doivent avoir une très-grande résistance ;

2° Les *moellons de banc-franc*, qui servent à élever les murs de clôture et ceux des bâtiments en élévation, à cause de la légèreté qu'ils acquièrent en séchant ;

3° Les *moellons tendres*, avec lesquels on peut faire à peu de frais des parements parfaitement dressés, à cause de la facilité avec laquelle on les taille.

Les moellons de roche et de banc-franc que l'on emploie à Paris et dans les environs viennent des plaines de Vitry, d'Arcueil, de Mont-

rouge, de Passy, du Moulin de la Roche, de Vaugirard, etc. Les moellons tendres qui sont les plus traitables et qui soutiennent le mieux les arêtes sont tirés des carrières de Saint-Maur, de Creteil, et de Carrière-Saint-Denis, Houilles, Nanterre, Montesson, ainsi que du Buisson-Richard, situé à Carrière-Sous-Bois, près Saint-Germain-en-Laye.

Sous le rapport de leur emploi, les moellons se divisent en quatre classes :

1° Les *moellons ébousinés*, qui sont ceux que le maçon taille lui-même légèrement sur les lits et les joints, avec sa hachette, au fur et à mesure qu'il les emploie ; on en construit ordinairement les murs de fondation, et les autres qui doivent recevoir un enduit.

2° Les *moellons smillés*. On désigne ainsi les moellons dont on a taillé assez proprement les parements, les lits et les joints, et que l'on emploie à la construction des voûtes et des murs dont la surface est seulement rejointoyée.

3° Les *moellons piqués*. Ces moellons sont taillés comme les précédents, mais avec plus de soin, de manière à en rendre les arêtes vives et bien droites.

4° Les *moellons d'appareil*. On nomme ainsi des moellons parfaitement équarris et parementés comme la pierre de taille, et que l'on taille sous différentes formes pour carreaux, angles de soupiraux, sommiers et voussoirs pour baies de portes cintrées ou en plates-bandes, etc. Les ouvrages faits avec ces moellons ne diffèrent de ceux construits en pierre de taille que par les moindres dimensions de leurs matériaux.

Les moellons qui n'ont subi aucun travail autre que celui de la carrière sont désignés sous le nom de moellons bruts ; lorsqu'ils sont durs et qu'ils ne contiennent pas de *bousin*, on les emploie dans cet état pour faire des massifs et autres maçonneries d'une grande épaisseur.

Les moellons trop petits pour être taillés sont employés comme *garnis* à l'intérieur des murs, on en remplissage dans les reins des voûtes.

Pour liaisonner les moellons, on suit les mêmes règles que pour la pierre de taille (539); ainsi il faut avoir soin, dans une même assise, de placer un moellon court à côté d'un long, et de ne jamais mettre les joints en ligne droite ; il faut éviter aussi que les joints verticaux se correspondent dans des assises en contact.

On pose simplement à la main les moellons sur une couche de mortier de 2 à 5 centimètres d'épaisseur sans faire usage de cales ; une fois posés, on les affermit en frappant dessus quelques coups de marteau, qui font souffler le mortier de tous côtés de manière que l'épaisseur des lits et des joints n'excède pas 2 centimètres. Les vides qui restent entre les moellons principaux se garnissent de mortier et d'éclats de pierre ou de moellons plus petits (espèce de blocage) (537).

TABLEAU des volumes de mortier et de plâtre en poudre employés par mètre de différentes maçonneries de moellons.

MAÇONNERIE.	MORTIER.	PLATRE en poudre.
Maçonnerie de blocage en moellonnaille de forme irrégulière, et dont le volume n'excède pas 0m.c.003. . .	m cub. 0.400	m. cub. 0.320
Maçonnerie ordinaire de massifs ou de murs, en moellons dont les parements sont bruts ou smillés et les lits et joints ébousinés et équarris.	0.320	0.250
Maçonnerie de moellons smillés ou d'appareils, pour parements de murs, voûtes, etc.	0.250	0.200

546. *Maçonnerie de meulière.* Pour parements, la meulière s'emploie en moellons smillés et quelquefois piqués (545). Dans certaines constructions, auxquelles on veut donner un aspect pittoresque, on l'emploie brute ou quelquefois grossièrement smillée, et on rocaille les joints des parements avec de la pierre meulière brûlée et concassée, dont on assujettit les fragments avec du ciment romain auquel on a donné la couleur rouge de la meulière brûlée (509) (*Art de construire*).

TABLEAU des volumes de mortier et de plâtre en poudre nécessaire à la pose d'un mètre cube de maçonnerie de meulière.

DÉSIGNATION DES MAÇONNERIES.	MORTIER.	PLATRE en poudre.
Maçonnerie de blocage ou garni de meulière dont le volume n'excède pas 0m.c.003.	m. cub. 0.450	m. cub. 0.360
Maçonnerie ordinaire en meulière brute, telle que massifs ou murs dont les parements sont recouverts d'un enduit ou rocaillés.	0.350	0.290
Maçonnerie de meulière piquée ou smillée pour parements de murs, de voûtes, etc.	0.270	0.220

547. *Maçonnerie de briques.* Il faut éviter de briser les briques pour les employer, et on doit les disposer de manière qu'elles se relient le mieux possible entre elles. La fig. 2, planche III, représente leur disposition dans une assise d'un mur dont l'épaisseur est égale à la longueur d'une brique; la fig. 3, planche III, est la disposition à adopter pour une épaisseur d'une brique et demie, et les fig. 4 et 5, même planche, sont des dispositions que l'on peut employer pour des murs de l'épaisseur de deux briques. Dans tous les cas, on a soin de croiser les joints de deux assises consécutives, afin que les briques se relient dans le sens vertical aussi bien que dans le sens horizontal. Il convient de

ne mettre la brique en place qu'après l'avoir plongée dans l'eau ; sans cette précaution, elle absorberait l'eau du mortier ou du plâtre. Cette précaution doit être aussi prise pour les moellons absorbants sortis depuis longtemps de la carrière. L'épaisseur des joints de mortier ou de plâtre ne doit pas excéder $0^m,01$ (*Art de construire*).

548. *Chaînes en pierre de taille, soubassements et baies de portes et croisées dans les constructions en moellons.* Ces chaînes peuvent être horizontales ou verticales. Dans le premier cas, sans présenter d'inconvénient, elles ont l'avantage de bien relier les petits matériaux placés au-dessus et au-dessous. Dans le second cas, elles augmentent la solidité et la stabilité aux points où elles se trouvent ; mais elles ont l'inconvénient de produire un gonflement ou un tassement différent des autres parties de la maçonnerie, ce qui occasionne des lézardes quand on n'a pas soin de laisser comme on le fait à Paris, quand on juge convenable de construire en pierres de taille les angles des maisons, du jeu entre les moellons et les chaînes en pierre. Ce jeu permet le gonflement du plâtre qui se cristallise, et ensuite son retrait, ou le tassement du mortier, mouvements qui sont proportionnels au nombre des joints et à leur épaisseur. On ne relie les moellons aux chaînes, et on n'enduit les parements du mur que quand le retrait s'est opéré dans toute la masse.

Il convient qu'un mur en moellons ou en briques soit chaussé d'une assise en pierre de taille, un peu enterrée et s'élevant au-dessus du sol, que l'on nomme *soubassement*. Dans les murs on doit placer la pierre la plus résistante à la surface du sol.

Un moyen efficace d'empêcher l'humidité de s'élever dans les murs est de placer une couche de bitume sur la première assise au-dessus de la fondation.

Les jambages, les linteaux et les appuis des croisées et des portes se font souvent en pierre de taille, surtout dans les constructions en briques. Il est nécessaire que les pieds-droits soient de plusieurs assises et de pierres d'inégales longueurs, afin qu'ils se relient bien avec les petits matériaux qui composent les trumeaux.

Les linteaux sont quelquefois formés d'une seule pierre ; mais alors il faut construire au-dessus une voûte qui reporte le poids de la maçonnerie supérieure sur les pieds-droits. Il vaut mieux construire les linteaux au moyen de plusieurs pierres disposées en voûte, dite *plate-bande*, que l'on doit appareiller avec soin.

On était dans l'usage à Paris, pour les maisons construites en moellons, de faire les linteaux en bois ; ce qu'il faut éviter, car le bois pourrissant, c'est ordinairement par là que les maisons périssent. Aujourd'hui on fait un usage presque exclusif du fer.

549. *Voûtes d'édifices.* Dans les bâtiments civils, on ne fait ordinairement usage de voûtes que pour les étages souterrains. Elles sont généralement en plein cintre, et on les fait en moellons, à l'exception des

pieds-droits des portes de communication d'un berceau à l'autre, lesquels sont généralement en pierre de taille. Les voûtes de caves sont ordinairement en moellons piqués, ou au moins smillés (545). Les moellons bruts ne présentent pas une solidité suffisante; il faut que les voussoirs soient appareillés, ou au moins taillés de manière qu'étant posés les joints tendent à l'axe; sans cela, la solidité de la voûte ne consisterait que dans l'adhérence du mortier.

Il arrive cependant quelquefois que l'on construit des voûtes pour les pièces du rez-de-chaussée des édifices publics tels que mairies, halles publiques, tribunaux. Lorsque les pièces voûtées doivent servir de lieu de réunion, on adopte le plein cintre, et il est rare alors qu'on les exécute en pierre de taille; pour réduire la dépense, on les fait le plus souvent en moellons, ou en briques ou en poterie. Quant aux voûtes d'arêtes, comme toute la poussée se reporte sur les pieds-droits et que les voussoirs inférieurs ont à résister à un effort considérable, on est obligé de les construire en pierre de taille.

Pour les voûtes en petits matériaux, il faut employer le meilleur mortier ou plâtre possible, afin que, reliant entre elles toutes les parties, la voûte et les points d'appui exigent une moindre épaisseur. C'est pour les mêmes raisons que l'on doit employer, surtout pour les voûtes exécutées hors du sol, les moellons de la plus faible densité, ou mieux la brique, qui fait parfaitement corps avec le plâtre ou le mortier, ou mieux encore la brique creuse ou la poterie, lesquelles, ayant la même adhérence que la brique, sont beaucoup plus légères (516).

Pour les voûtes, comme pour les murs en élévation, les moellons doivent être disposés par cours d'assise, de manière à faire croiser les joints de deux assises voisines, et de telle sorte que dans une même assise les moellons formant boutisse soient placés entre deux carreaux (539). Si la voûte a une épaisseur de plusieurs moellons, le second rang de moellons doit se relier avec le premier.

On monte les deux côtés de la voûte à la fois, afin que leur poussée se fasse équilibre sur le cintre et ne le détruise pas, et que de plus le mortier prenant la même consistance des deux côtés, le tassement soit égal. On ne place les planches du cintre qu'au fur et à mesure que l'on élève la voûte, afin que l'ouvrier ait l'ouvrage devant lui et de plus placé à une hauteur convenable pour sa facile exécution.

Quand il ne reste plus que trois assises à poser, on commence à bander et à fermer la voûte par l'une de ses extrémités. On pose de part et d'autre deux ou trois moellons aussi longs que possible que l'on appuie sur le cintre; une fois en place, on les affermit à coups de marteau sur un bourrelet de mortier soufflant; on recouvre leur face de mortier, et on introduit alors la clef bien taillée d'avance en forme de voussoir dans le vide laissé entre les moellons que l'on vient de poser; on l'enfonce en la frappant avec une *dame* du poids de 15 à 20 kilog., jusqu'à ce

qu'elle s'appuie sur le cintre. Il est évident que l'on doit prendre les plus beaux et les meilleurs moellons pour former les dernières assises de voussoirs, et surtout la clef.

Lorsque ces premiers moellons sont bien assurés et que le mortier souffle de toutes parts, on introduit dans les joints, à coups de marteau, des éclats de pierre dure. Cette première clef étant bien bandée, on continue à fermer la voûte en opérant de même et en allant à reculons.

Les voûtes en briques peuvent se construire de la même manière que celles en moellons, en leur faisant former voussoir sur leur épaisseur, et en les plaçant en carreaux et boutisses si l'épaisseur de la voûte est suffisante. Dans ce cas, on peut les relier avec du plâtre ou du mortier en ayant soin de garnir les joints à l'extradose avec des éclats d'ardoise ou de pierre mince, à moins cependant que les briques n'aient la forme de voussoirs.

Quelquefois les briques sont simplement posées à plat sur le cintre, et alors reliées par du plâtre ou du ciment romain; on emploie ce procédé pour faire des voûtes minces et plates. On prépare dans les murs qui doivent porter la voûte des coussinets dans lesquels la voûte vient s'engager et s'appuyer. Ces voûtes sont le plus souvent formées de plusieurs épaisseurs de briques.

Pour les voûtes en briques, il faut prendre la précaution indiquée n° 547, qui consiste à tremper les briques dans l'eau avant de les mettre en contact avec le plâtre, sans quoi elles absorbent l'eau qui a servi à gâcher celui-ci, qui alors ne contient plus la quantité d'eau suffisante à sa cristallisation.

On ne doit jamais fermer la voûte à la clef avant que le plâtre ait fait tout son effet, sans quoi le gonflement du plâtre dérangerait les pieds-droits de leur aplomb.

On doit commencer les voûtes en arc de cloître par la clef, et aller en s'avançant vers les naissances; sans cette précaution, on aurait beau laisser du jour à la clef, comme les quatre parties de la voûte se contre-butent mutuellement entre elles, la poussée due au gonflement du plâtre se transmettrait toujours sur les pieds-droits.

550. *Fondations.* Lorsque le sol est formé jusqu'à une certaine profondeur de terres végétales qui ont été remuées, ou de matières rapportées, comme il n'offre pas assez de résistance pour supporter sans affaissement les constructions à ériger, on est obligé de le déblayer, et de descendre la fouille jusqu'à ce que l'on ait atteint une couche de terrain qui présente une compacité et une résistance suffisantes. Il arrive souvent que la couche solide se trouve à une profondeur telle, que l'on doit renoncer à l'atteindre par les fouilles et à y asseoir directement les fondations; alors on a recours à des moyens auxiliaires pour donner au terrain qui la surmonte la solidité requise. Ces moyens varient selon la

nature du sol, nature que l'on détermine, soit par des sondages, soit en creusant des puits.

Malgré le grand nombre de nuances sous lesquelles les terrains se distinguent, si on les considère sous le rapport du plus ou moins de résistance qu'ils peuvent offrir pour les fondations, on peut les diviser en trois classes principales.

La première classe renferme les terrains les plus favorables, sur lesquels on peut établir directement les fondations ; tels sont les diverses espèces de rocs, les tufs, les marnes et les terrains pierreux qu'on ne peut attaquer qu'à la mine ou au pic.

La deuxième classe comprend tous les terrains graveleux et sablonneux, qui ont la propriété d'être incompressibles lorsqu'ils sont encaissés.

La troisième classe renferme tous les terrains qui présentent des difficultés plus ou moins grandes, lorsqu'il s'agit de les consolider et de leur donner une résistance uniforme suffisante dans toute l'étendue des fondations. Les terrains mouvants, comme le sont principalement ceux qui sont glaiseux, et les terrains compressibles, comme le sont surtout ceux qui sont tourbeux ou fraîchement rapportés, appartiennent à cette espèce.

Lorsque les fouilles des fondations sont descendues à une profondeur convenable et ont atteint un terrain suffisamment résistant, après en avoir nivelé et dressé parfaitement le fond, on procède à l'exécution de la maçonnerie de fondation. Si cette maçonnerie est en moellons ou en meulière, l'ouvrier choisit les morceaux les plus gros et les plus résistants et il commence son travail en en posant une première assise sur un lit de mortier qu'il a étendu sur le fond de la fouille, en les liaisonnant les uns avec les autres et en les frappant avec sa hachette pour les bien affermir et imprégner de mortier.

Quoique la maçonnerie des fondations soit cachée, on doit, avec plus de soin encore que pour celle à parements vus, prendre toutes les précautions qui assureront sa solidité. Une mauvaise exécution occasionnerait des effets très-nuisibles à la stabilité de la construction : les murs se fendraient, perdraient leur aplomb, et il se formerait des crevasses dans les voûtes et dans toutes les parties de l'édifice.

Pour que les fondations soient solides et que le tassement soit uniforme dans toutes les parties de la construction, il faut composer chaque assise de matériaux de même hauteur et de même dureté, en plaçant les plus résistants dans le bas. Si quelques matériaux sont tendres et de médiocre qualité, on évite de les employer pour les parties de fondations qui auront à supporter de grandes masses de maçonnerie ou de fortes charges; ils pourraient s'écraser et compromettre la solidité de la construction, sinon en amener la ruine.

Lorsqu'une fondation repose sur le sol naturel incompressible, il suffit de lui donner de 0m,05 à 0m,10 d'empatement, c'est-à-dire de saillie, sur chaque face du mur qu'elle doit supporter; cela suffit pour que l'on soit sûr que la fondation sera pleine sur une épaisseur au moins égale à celle du mur et qu'il n'y aura pas de porte-à-faux, malgré le

peu de soin que l'on met à bien dresser les parements dans les tranchées, et aussi pour que la résistance soit plus grande en raison de l'excès de charge que supporte la fondation.

Pour des *piliers isolés supportant de fortes charges*, l'empatement précédent 0m,05 à 0m,10 de la fondation sur tout le pourtour de chaque pilier est insuffisant; on est obligé de les fonder sur un mur continu construit comme pour le mur que remplacent ces piliers. Souvent même, afin de répartir la pression des piliers sur toute la longueur du mur de fondation, on dispose ce mur en voûtes renversées dont les naissances sont placées sous les socles des divers piliers. Dans certains cas même, lorsqu'il y a plusieurs rangs de piliers, ceux-ci reposent sur les naissances de voûtes d'arête renversées qui reportent la charge sur toute l'étendue de l'espace qui sépare les piliers.

C'est surtout pour des piliers isolés que l'on doit placer les pierres les plus résistantes au niveau du sol jusqu'à une profondeur de 0m,15 à 0m,20 (n° 518).

Afin que le tassement soit le même dans tous les piliers isolés, on les construit du même nombre d'assises, on donne la même épaisseur aux joints, et on taille les lits pleins et bien perpendiculaires à l'axe.

Dans un but d'économie, quand on est obligé de descendre à une grande profondeur pour trouver le sol résistant, les fondations peuvent être composées d'une série de piliers convenablement espacés et reliés à leur sommet par des voûtes en plein cintre ou en arc de cercle, sur lesquelles on érige la construction.

Pour les constructions de quelque importance, on était dans l'usage de commencer les fondations par une ou plusieurs assises de libages (539), mais depuis quelque temps on y a substitué le béton, qui ne coûte qu'environ le quart des bons libages; on donne à la couche de béton de 0m,30 à 0m,80 d'épaisseur, avec une saillie sur les parements de la fondation.

Les fondations en béton doivent être exécutées par couches horizontales. Afin que les parties faites un jour se raccordent bien avec celles qui se posent le lendemain, on termine leurs extrémités par redans inclinés, et lorsqu'on recommence, avant de placer du nouveau béton, on applique une couche de mortier frais sur tout le béton posé la veille et déjà raffermi (534).

Si le sol incompressible est situé sous l'eau ou sous des couches compressibles à des profondeurs si grandes que l'on ne puisse le mettre à découvert sans des dépenses trop considérables, on a recours à l'un des moyens suivants :

1° *Fondations sur pilotis.* Ce moyen consiste à enfoncer, dans toute l'étendue des fondations, des pieux espacés de 0m,80 à 1m,20 d'axe en axe, selon la charge qu'ils doivent supporter et suivant leur diamètre, qui est en général le 1/24 de leur longueur sans avoir moins de 0m,18.

Ces pieux battus au refus peuvent supporter jusqu'à 50 kilog. par centimètre carré de section (125 et 215).

Les pieux étant enfoncés en quinconce, on les recèpe tous de niveau à une hauteur convenable, on enlève entre eux la terre ameublie par le battage, et on la remplace par un blocage en pierres sèches si on opère à sec, ou par du béton ou de la maçonnerie à mortier hydraulique dans le cas contraire. On a soin de comprimer fortement ces matériaux à mesure qu'on les pose, afin qu'ils maintiennent bien les têtes de pieux, qu'ils augmentent les frottements latéraux s'opposant à l'enfoncement, et qu'ils ajoutent le plus possible à la rigidité du système.

On pose ensuite un grillage en charpente, formé de longrines reliant les files longitudinales de pieux et de traversines s'assemblant à mi-bois sur les longrines. On arase le remplissage au niveau du grillage, et sur le tout on établit une plate-forme en madriers, sur laquelle on élève l'édifice.

Comme la plate-forme unie adhère mal à la maçonnerie, il peut être convenable de la remplacer par une forte couche de béton enveloppant les têtes de pieux, sauf à placer sur ce massif, si on le juge nécessaire, un ou deux rangs de forts libages pour répartir convenablement la pression.

Ce premier mode peut s'employer soit qu'il s'agisse de fonder sur des terrains secs qui ne sont incompressibles qu'à une certaine profondeur, soit qu'il s'agisse de fonder dans l'eau. Les procédés suivants sont spéciaux à ce dernier cas.

2° *Fondations à l'aide de batardeaux.* On nomme batardeaux, des digues dont on circonscrit l'emplacement de la fondation, afin de pouvoir épuiser l'eau, et ensuite établir la fondation sur le sol mis à sec, en opérant comme il a été indiqué ci-dessus.

Lorsque la profondeur d'eau ne dépasse pas 1 mètre, le batardeau se fait uniquement en terre, en lui donnant de $0^m,80$ à $1^m,20$ d'épaisseur moyenne.

Si l'eau a une certaine vitesse ou une profondeur de $1^m,00$ à $1^m,50$, on enfonce avec le mouton une file de pieux, contre laquelle on fixe des madriers jointifs, et c'est contre ce barrage en charpente, destiné à défendre la terre, que l'on tasse celle-ci pour terminer le batardeau. Quelquefois on a remplacé les madriers par des fascines.

Quand la profondeur de l'eau excède $1^m,50$, le batardeau s'établit encore plus solidement. On bat deux files parallèles de pieux espacés de 1 mètre environ ; on réunit les pieux de chaque rang par des madriers que l'on cloue horizontalement; contre ces madriers on appuie des palplanches assemblées entre elles à rainure et languette, et que l'on enfonce jusqu'à ce que leur extrémité soit inférieure au sol sans consistance. Après avoir enlevé la vase entre les deux cloisons ainsi formées, on remplit leur intervalle avec de la terre. Des entretoises reliant entre

elles les deux cloisons ajoutent beaucoup à la solidité du batardeau.

On fait encore des batardeaux en maçonnerie hourdée en mortier hydraulique, et dans plusieurs ports de mer on en a établi en béton.

3° Pour fonder à de grandes profondeurs, on emploie encore quelquefois un *caisson* en bois que l'on amène sur l'emplacement de la fondation, et sur le fond plat duquel on établit la maçonnerie. Le caisson finit par s'enfoncer jusque près du sol, par suite du poids de la maçonnerie; alors, afin de terminer l'échouage convenablement, on laisse pénétrer l'eau dans le caisson. On enlève ensuite les parois latérales du caisson, qui n'étaient retenues que par des tirants. Il est évident que le sol a dû être à l'avance consolidé par des pieux, si cela était nécessaire, et nivelé.

4° Le moyen de fonder par *encaissement* est généralement préféré au précédent à cause de sa simplicité et de son prix modéré. Il consiste à former autour de l'emplacement des fondations une enceinte de pieux et de palplanches; à draguer dans cette enceinte jusqu'à ce que l'on atteigne un sol suffisamment compressible, et à la remplir de béton, sur lequel on érige ensuite la construction.

Si le fond du lit était un roc dans lequel il y a impossibilité d'enfoncer des pieux, on aurait recours à un caisson sans fond, construit sur le chantier, et dont les parois seraient formées de poteaux montants et de fortes palplanches, le tout maintenu par plusieurs cours d'entretoises horizontales. On amène le caisson sur l'emplacement de la fondation, on le fait échouer en le chargeant convenablement, puis on établit le massif de béton.

Fondations sur un sol compressible. On parvient à donner aux terrains compressibles un certain degré de résistance en y battant des pieux en bois, ou en y enfonçant de distance en distance un pieu en bois que l'on retire pour remplir l'alvéole qu'il laisse avec du mortier ou du béton que l'on pilonne fortement au fur et à mesure de leur pose. On fait autant de ces pieux en béton que cela est nécessaire pour rendre le sol résistant, puis on recouvre ce sol d'une couche de béton bien pilonné. Lorsque le sol est constamment sec, on peut à la rigueur substituer le sable au mortier ou béton.

La tête du pieu doit être garnie d'une frette en fer pour résister aux chocs du mouton, et percée d'un trou dans lequel on passe une pince ou une barre de fer, qui sert, pendant le battage, à remuer et tourner le pieu au fur et à mesure qu'on l'enfonce, de manière à lisser les parois de l'alvéole et à leur donner une certaine consistance qui permet la pose du béton sans qu'elles s'éboulent; ce mouvement imprimé au pieu le rend facile à retirer quand il est entièrement enfoncé.

Si l'espace occupé par la fondation était très-grand, on pourrait, après avoir consolidé le sol au moyen de pieux en béton, le couvrir d'un massif de sable de $0^m,60$ à $0^m,80$ d'épaisseur, que l'on forme par couches

successives de $0^m,15$ à $0^m,20$, parfaitement pilonnées et mouillées d'un lait de chaux très-épais; ce massif, que l'on couvre également d'une couche de béton bien pilonnée, est incompressible et offre l'avantage de répartir uniformément la charge sur toute l'étendue de la fondation.

Racinaux. On nomme ainsi des pièces de charpente méplates, de $0^m,30$ sur $0^m,12$, que l'on place bien de niveau sur le sol compressible, et sur lesquelles on fixe avec des chevillettes une plate-forme en madriers de chêne de $0^m,085$ d'épaisseur. Avant de placer cette plate-forme, on a soin de remplir l'intervalle des racinaux avec du béton ou avec des moellonnailles posées à bain de mortier. C'est sur la plate-forme que l'on établit la fondation.

On conçoit que sur un sol consolidé par des pieux en bois ou en béton on peut encore faire usage d'une plate-forme en bois pour bien répartir la pression; mais le plus souvent on emploie une couche de béton assez forte pour qu'elle ne puisse se briser.

Quand le *sol* est *très-compressible*, on commence par lui donner un certain degré de solidité, soit en le chargeant de pierres qui s'y enfoncent, soit en y faisant entrer des pieux par le gros bout, afin que l'élasticité du terrain ne les soulève pas, soit encore en combinant ces deux moyens, c'est-à-dire en enfonçant des pierres entre les pieux. Sur le sol ainsi préparé, on poserait ensuite, soit la plate-forme en bois, soit la couche de béton si on ne craint pas sa rupture.

Les fondations sur des sols argileux détrempés par les eaux sont celles qui offrent le plus de difficultés. En vertu de leur viscosité et de leur élasticité, ces terrains se comportent à peu près comme des liquides. Ils transmettent la pression en tous sens; ils s'affaissent inégalement pour peu qu'ils ne soient pas chargés uniformément; les pilotis n'y adhèrent pas et tendent à sortir quand on bat les voisins. Il faut pour construire avec quelque sécurité sur un terrain de cette nature, avoir recours à des plate-formes d'une grande étendue, à de larges empatements, répartir les pressions avec une grande uniformité, même pendant l'exécution du travail, et souvent charger par des remblais provisoires les abords de la construction. Il est même prudent, avant d'élever les parties supérieures de l'édifice, de charger les massifs inférieurs, pendant plusieurs mois, d'un poids au moins égal à celui qu'ils auront à supporter plus tard.

Les difficultés sont plus grandes encore lorsque ces terrains sont noyés. On est obligé alors d'avoir recours à la fois aux moyens de fonder sous l'eau, et à ceux relatifs aux terrains compressibles.

Les *enrochements* sont des massifs de maçonnerie en pierres sèches, formés en jetant simplement, sans apprêt, des blocs dans l'eau, et dont on entoure les fondations qui peuvent être affouillées, comme le sont souvent celles des piles de ponts, des jetées, etc.

Immersion du béton. Quand la profondeur d'eau n'atteint pas $1^m,00$,

le béton s'immerge à talus coulant. C'est-à-dire qu'on décharge sur le bord un massif de béton que l'on presse à la dame, de manière à le faire glisser doucement sous l'eau. On charge successivement le bord du massif ainsi obtenu, et en dressant le bourrelet on fait insensiblement avancer le talus et la masse jusqu'au parfait remplissage de la fouille, en même temps que l'on tasse la maçonnerie à la dame plate, à mesure de l'avancement du travail. »

En avant de l'atelier d'immersion, des ouvriers, armés de raclettes en tôle et de larges balais en bouleau, nettoient, par des mouvements doux, le sol des fondations au pied du béton, et entraînent les vases dans des trous, d'où on l'extrait. De plus, à chaque reprise du travail, des hommes, munis de larges balais en paille, nettoient, sans agiter l'eau, la surface du béton précédemment coulé. Enfin, chaque fois que le béton doit rester exposé sans revêtement à l'action des eaux, on a soin de dresser, comprimer et lisser, au moyen d'un rouleau en fonte ou en pierre, la couche supérieure du massif.

Quand la hauteur d'eau excède 1m,00, plusieurs procédés, différant seulement par leurs détails, peuvent être employés; le plus usité, et celui qui paraît donner les meilleurs résultats, consiste à opérer l'immersion du béton au moyen de caisses prismatiques à fond mobile, contenant chacune environ un sixième de mètre cube, descendues, à l'aide d'un treuil, jusque sur le fond des fouilles, puis remontées seulement de la quantité nécessaire pour en permettre la vidange.

551. ***Outils d'un compagnon maçon.*** Un maçon se sert :

1° De deux *auges* en bois de 0m,75 de longueur en haut et 0m,50 au fond, sur 0m,50 de largeur en haut et 0m,30 au fond, et de 0m,22 à 0m26 de profondeur;

2° D'une *truelle* de 0m,19 de longueur, moins large à l'extrémité que près du manche. A Paris, quand elle sert à prendre le mortier, on l'appelle *guerluchone;* la *truelle* est employée pour le plâtre. La guerluchone est en fer et légèrement arrondie à son extrémité; la truelle est en cuivre et à angles vifs, afin qu'elle ne soit pas attaquée par le plâtre et que l'on puisse bien nettoyer les angles de l'auge avant de gâcher du nouveau plâtre;

3° D'une *hachette* qui a une tête carrée d'un côté; la tête sert à débiter les moellons et à les assujettir sur le lit de mortier, et le tranchant à tailler les moellons qui n'ont pas des formes convenables et surtout à rendre les lits horizontaux. Le *marteau* de maçon n'est autre chose qu'une grosse hachette dont le tranchant est remplacé par un pic très-allongé.

4° De *cordeaux* et de *fiches* en fer servant à indiquer la position du mur à construire. Pour fixer les cordeaux, on établit, de part et d'autre du mur à ériger, deux liteaux sur lesquels on cloue différentes traverses qui servent d'attaches aux ficelles. Quand le mur à établir se raccorde à d'autres existants, les fiches en fer, que l'on implante dans ces murs, servent à fixer les cordeaux;

5° D'un *fil à plomb* qui sert à élever les parements verticaux. Outre le tronc de cône en fer ou en cuivre, fixé à l'une des extrémités de la ficelle, une plaquette carrée en tôle ou en cuivre, dont le côté est égal au grand diamètre du tronc de cône, porte en son milieu un trou dans lequel passe librement

la ficelle. De ces dispositions, il résulte que le maçon appliquant une arête de la plaquette contre le parement du mur, le tronc de cône, qu'il a convenablement éloigné de la plaquette, sera tangent au parement du mur, si celui-ci est d'aplomb; il en sera éloigné si le mur surplombe, et il portera dessus s'il a du fruit;

6° De deux *règles* en bois de 2 mètres de longueur, dont une plate de 0m,10 sur 0m,03, et une carrée de 0m,04 de côté, que le maçon emploie pour battre les nus, faire les arêtes, etc. Six *chevillettes* à crochet en fer rond, de 0m,30 environ de longueur, lui servent à fixer les règles sur place;

7° D'un *niveau de maçon*. Rectangle formé par quatre règles en bois, au milieu d'un des grands côtés duquel est fixé un petit fil à plomb. Après avoir fait reposer la base de l'équerre sur le lit d'une pierre, si le fil correspond à une marque faite au milieu de cette base, c'est que le lit est horizontal. Pour vérifier si une surface d'une certaine étendue ou deux petites surfaces éloignées sont de niveau, le maçon applique une règle sur ces surfaces, et c'est sur la règle, qui doit avoir une égale largeur dans toute sa longueur, qu'il applique son équerre. Le *niveau de poseur* est triangulaire, et le fil à plomb est suspendu à l'un des sommets;

8° D'un *oiseau* pour le transport du mortier. Il est formé de deux planches clouées à angle droit, sous l'une desquelles se trouvent deux branches de 0m,50 environ de longueur, que l'ouvrier met à califourchon sur ses épaules. Pour descendre le mortier dans les fondations, on établit une espèce d'auge formée de deux planches clouées à angle droit, allant du bord supérieur de la fouille jusque sur le massif que l'on établit. Le porteur de mortier versant l'oiseau à la partie supérieure de l'auge, celle-ci amène le mortier au point où il doit être employé.

Pour le plâtre, on ne fait pas usage de l'oiseau; le maçon a deux auges (1°), et pendant qu'il emploie le plâtre qui est dans l'une, le garçon place dans l'autre le plâtre et la quantité d'eau convenable, sans agiter le mélange, et il l'apporte, en la plaçant sur sa tête, au maçon qui seulement agite bien le plâtre dans l'eau (519);

9° D'une *taloche*. Petite planchette rectangulaire en bois léger, sur l'une des faces de laquelle se trouve une poignée également en bois; elle sert à appliquer le plâtre contre les parois des murs et contre les lattes des plafonds, et à l'y maintenir jusqu'à ce qu'il ait pris assez de consistance pour y rester adhérant;

10° D'une *truelle bretée*. C'est une plaque d'acier rectangulaire, portant un manche perpendiculaire à son plan; un des grands côtés de la plaque est denté et sert à dresser les surfaces, l'autre est uni et se passe sur le plâtre après le côté denté;

11° D'un *riflard*. Ciseau de 0m,06 de largeur, avec manche en bois; il sert à couper les repères et les nus, à dégager les cueillies d'angle, etc.

12° D'un *guillaume*. C'est une espèce de rabot en bois dur, taillé en biseau et garni d'une lame d'acier à l'une de ses extrémités, et évidé de manière à former une poignée vers l'autre extrémité. Le guillaume sert à dresser et à prolonger les arêtes, et à couper les moulures;

13° Enfin d'une série de petits outils en acier, tels que *gouges*, *petits fers*, *grattoirs*, *équerres*, *compas*, *petits guillaumes*, etc., employés pour faire les retours de corniches, les chapiteaux et tous les travaux de moulures, où on ne peut faire glisser le calibre.

PANS DE BOIS ET CLOISONS.

552. *Pans de bois et cloisons.* Dans les localités où la pierre et la brique sont coûteuses, on les remplace par le bois pour les façades de maisons sur les cours, pour les petites ailes de peu d'importance, et surtout pour les murs de refend. Les murs de face sur la rue, et les murs mitoyens, qui contiennent ordinairement les cheminées, doivent être en maçonnerie.

Généralement les cloisons sont construites pour bien distribuer les appartements; elles sont d'un prix modéré et chargent peu les planchers; celles que l'on emploie le plus à Paris sont :

1° Les cloisons légères en menuiserie à claire voie, lattées, hourdées et ravalées en plâtre des deux côtés;

2° Celles en planches jointives, lattées et recouvertes d'un crépi et d'un enduit en plâtre de chaque côté;

3° Les cloisons en carreaux de plâtre pleins ou creux;

4° Celles en briques de champ ou de $0^m,055$ d'épaisseur, et celles en briques à plat, ou de $0^m,11$ d'épaisseur, l'une et l'autre rejointoyées ou ravalées en plâtre.

En raison du peu d'épaisseur des pans de bois et de leur faible poids, on conçoit qu'ils n'ont aucune stabilité par eux-mêmes (175), et qu'ils ne se soutiennent que parce qu'ils sont maintenus par les murs, pans de bois ou cloisons en retour, ou encore par les combles et planchers.

Dans les pays où le bois est très-abondant, comme en Russie, les pans de bois sont formés de pièces jointives horizontales qui s'assemblent à mi-bois dans celles qui composent les pans perpendiculaires. On conçoit qu'en raison de la grande quantité de bois qu'entraîne cette disposition, on doit y renoncer dans les pays où le bois a une certaine valeur; alors on forme les pans de bois et les cloisons avec des poteaux verticaux non jointifs, s'assemblant dans des pièces horizontales.

La disposition la plus généralement adoptée pour les pans de bois et cloisons est celle indiquée fig. 6, pl. III, en laissant entre les pièces des vides égaux aux pleins. Quand toute la charpente d'un pan de bois est montée, on remplit les vides avec de la maçonnerie de petits moellons, de briques ou le plus souvent de plâtras (débris, plus ou moins gros, de plafonds, de pans de bois ou de toute autre construction); faire ce remplissage s'appelle *hourder*. Pour des constructions de peu d'importance, les vides laissés entre les pièces de bois sont beaucoup plus grands que les pleins. On fait des cloisons vides, sans hourder; on les construit ainsi quand elles sont en porte-à-faux sur des planchers.

Un pan de bois de trois étages, hourdé plein et ravalé sur les deux faces aurait une épaisseur de 0m,216, et une stabilité (poids multiplié par la demi-épaisseur (475)), seulement égale au 1/7 de celle d'un même mur de face en moellons ou en briques, qui devrait avoir 0m,45 d'épaisseur.

Ce n'est qu'en reliant les pans de bois aux murs mitoyens, aux pans de bois transversaux et aux planchers, à l'aide de tenons ou harpons en fer, qu'on peut leur donner une stabilité convenable.

Non-seulement les pans de bois sont moins durables que les murs, mais ils sont aussi plus coûteux dans beaucoup de localités.

Les murs sont généralement préférés aux pans de bois toutes les fois que l'espace le permet.

Noms des différentes pièces qui composent un pan de bois, fig. 6, pl. III :

aaa *sablières*, pièces dans lesquelles toutes les pièces verticales s'assemblent à tenons et mortaises;

a'a' *sablières de chambrée*;

a'' sablière prenant le nom de *poitrail*, quand, comme dans la figure, elle surmonte une large ouverture;

bb *poteaux corniers*, ils sont plus forts que les autres;

ccc *poteaux d'huisserie*. L'ensemble des poteaux d'huisserie et du *linteau*, pièce horizontale qui couronne une porte ou une croisée, se nomme *l'huisserie* de la porte ou de la croisée;

ddd poteaux de *remplage*, c'est-à-dire de remplissage; ils sont ordinairement plus petits que les poteaux d'huisserie et surtout que les poteaux corniers;

eee *guettes*, pièces de bois faisant un angle de plus de 60 degrés avec les sablières; on les incline en sens inverse, afin d'obvier aux inconvénients qui résultent du relâchement des assemblages par suite de la dessiccation des bois;

fff *décharges*, on nomme ainsi les pièces dont l'inclinaison sur les sablières ne dépasse pas 60 degrés; elles sont destinées non-seulement à obvier au relâchement des assemblages, mais aussi à reporter sur les poteaux d'huisserie le poids des trumeaux qui se trouvent au-dessus d'un grand vide, de manière à soulager le *poitrail* qui couronne cette ouverture, ce qui est surtout nécessaire quand le pan de bois porte plancher.

Les guettes et les décharges s'assemblent à *tenons en about* dans les pièces horizontales auxquelles elles aboutissent, c'est-à-dire que les tenons et leurs épaulements sont coupés à peu près en retour d'équerre du côté de l'angle aigu, de manière à ce qu'ils pénètrent à angle droit dans les pièces qui les reçoivent.

Quelquefois, afin de donner plus de solidité aux trumaux d'encoignure, on remplace les simples guettes ou décharges par des croix de Saint-André, formées par des pièces qui s'assemblent à mi-bois au point où elles se rencontrent, et à tenons en about dans les sablières;

ggg *tournisses*, pièces de bois assemblées à tenons et mortaises dans les sablières et dans les guettes ou décharges. Quelquefois on se contente de couper les tournisses obliquement, à la demande des guettes ou décharges, sans faire de tenon; on les arrête seulement avec de grands clous, appelés *dents de loup*, ou avec des chevillettes; afin de ne pas

fendre les tournisses, on prépare les trous des clous ou des chevillettes à l'aide d'une vrille ;

hhh *potelets*, petits poteaux garnissant le dessus des linteaux et le dessous des appuis des croisées ;

iii bouts des solives des planchers; lorsque les solives sont posées sur des cloisons, elles ne sont pas apparentes sur la façade.

Nous avons donné au n° 475 une règle pour déterminer l'épaisseur d'un pan de bois; cette épaisseur, pour un pan de bois élevé de 3 à 4 étages, est ordinairement de 0^m,20 à 0^m,25. Les poteaux corniers ont de 0^m,25 à 0^m,27 d'équarrissage; cet équarrissage est le même pour les poteaux formant les pieds-droits d'une grande ouverture, et l'angle des trumeaux dits *d'étriers*. Les sablières ont de 0^m,216 à 0^m,25, et les pièces de remplissage, poteaux, tournisses, potelets, guettes, décharges, croix de Saint-André, ont de 0^m,162 à 0^m,19.

Un poitrail de devanture de boutique ou de porte cochère doit, lorsqu'il supporte un pan de bois, avoir une dimension verticale égale au 1/12 environ de la largeur de l'ouverture qu'il couronne (220).

Lorsque les cloisons intérieures portent planchers, les poteaux d'aplomb doivent avoir une épaisseur égale au 1/12 de leur hauteur. Les décharges et les sablières ont une largeur et une épaisseur plus fortes de 0^m,027 environ. Les cloisons de simple séparation n'ayant pas besoin de monter de fond, il suffit que leurs dimensions soient moitié des précédentes; souvent même, afin de les rendre plus légères, au lieu de les hourder pleines, on les laisse creuses, et on pose seulement un enduit sur des lattes clouées l'une à côté de l'autre sur les poteaux. Afin de diminuer les chances de flexion des poteaux de ces cloisons creuses, quand ils ont une certaine hauteur, on les réunit en leur milieu et en d'autres points, si cela est nécessaire, par des liernes horizontales.

Une cloison de séparation doit pouvoir être posée d'une manière quelconque sur le plancher de la pièce que l'on sépare; mais lorsqu'on est obligé de la poser dans le sens de la longueur des solives qui supportent le plancher, afin de soulager la solive qui se trouve en dessous, et qui en supporte le poids, on place des décharges qui reportent une partie de ce poids sur les extrémités de la solive, sinon sur le mur. C'est encore dans le but de soulager la solive travaillante, que l'on met quelquefois dans l'intérieur de la cloison des tirants qui embrassent la solive et vont s'attacher sur les décharges.

Le tableau suivant, extrait du *Traité de l'art de la charpenterie*, par M. Émy, contient les grosseurs que les praticiens donnent le plus communément, au rez-de-chaussée, aux pièces qu'ils emploient dans les pans de bois de 3^m,25 à 3^m,90 sous planchers, pour les bâtisses de trois étages. Les pans de bois se montent d'aplomb à l'intérieur; mais à l'extérieur ils ont un fruit de quelques lignes par étage, ce qui

diminue en conséquence l'équarrissage des pièces des parties supérieures des pans de bois.

PANS DE BOIS DES FAÇADES (de $3^m,90$). . . . . . *Épaisseur.*	$0^m.217$ à	$0^m.244$
Poteaux corniers et poteaux de fond. *Équarrissage.*	0 .244	0 .271
Poteaux d'étrière.	0 .217	0 .244
Sablières hautes et basses.	0 .217	0 .244
Poteaux d'huisserie.	0 .189	0 .217
Poteaux de remplage.	0 .162	0 .217
Écartement des poteaux de remplage.	0 .271	0 .225
Guettes, décharges, croix de Saint-André.	0 .162	0 .217
Tournisses et potelets.	0 .135	0 .217
PANS DE BOIS INTÉRIEURS ou cloisons { de $3^m,90$. *Épaisseur.*	»	0 .162
PANS DE BOIS INTÉRIEURS ou cloisons { au-dessus de $3^m,90$. . .	»	0 .189
Poteaux { portant plancher. . . . . . *Équarrissage.*	0 .135	0 .162
Poteaux { ne portant pas plancher.	0 .108	0 .135
CLOISONS DE REFEND ou en porte-à-faux.	0 .081	0 .135

Toutes les pièces qui composent un pan de bois ou une cloison en charpente doivent être assemblées entre elles à tenons et mortaises entrés de force et chevillés.

Afin de garantir les bois de l'humidité, on établit les pans de bois et les cloisons sur des soubassements en moellons ou en pierre de taille, s'élevant au moins à $0^m,60$ au-dessus du sol.

Une fois la charpente d'un pan de bois établie, on procède au remplissage. Pour cela, on cloue sur une de ses faces des lattes éloignées entre elles de $0^m,06$ à $0^m,11$; on garnit l'intervalle entre les poteaux de plâtras hourdés grossièrement avec du plâtre, et on place un lattis du côté où le *hourdis* a été fait, comme sur l'autre face. Cette opération faite, après avoir nettoyé la poussière et arrosé le hourdis, on procède au *gobetage*, qui consiste à appliquer du plâtre liquide sur le lattis, avec un balai ou avec la main. Une fois le gobetage sec, on applique le *crépi*, qui se fait avec du plâtre gâché plus serré ; ce crépi se jette à la main et s'étend avec le côté de la truelle, afin que la surface restant raboteuse, l'*enduit* ou troisième couche y adhère mieux.

Le crépi se fait avec du plâtre écrasé passé au panier, au lieu que l'enduit se fait avec du plâtre fin passé au tamis de crin (519).

Afin d'obtenir des surfaces bien planes, on fixe deux règles sur le gobetage, après les avoir plombées avec soin, et au moyen d'une règle mobile qu'on traîne sur les deux règles fixes, qui doivent effleurer l'enduit, on arrive à rendre ce dernier parfaitement plan. L'enduit s'étend avec le dos de la truelle ou la *taloche;* mais comme, malgré tous les soins que l'on peut prendre, il est impossible d'obtenir une surface plane bien unie, on arrive à ce résultat au moyen de la truelle bretée (551).

On fait quelquefois des cloisons creuses, c'est-à-dire qu'on supprime

le hourdis entre les pièces de bois qui forment la charpente; dans ce cas, le lattis doit être jointif, et on applique successivement dessus, le gobetage, le crépi et l'enduit, comme dans le cas précédent.

PLANCHERS.

333. *Planchers.* Ce sont les séparations des étages d'un édifice; ils se composent de trois parties principales : le plafond, la charpente et le carrelage ou parquet.

La fig. 7, pl. III, représente en plan la manière dont on dispose les différentes pièces d'une charpente de plancher.

aa **solives.** Leurs extrémités reposent sur des murs, des pans de bois, des cloisons, et quelquefois, dans les anciennes constructions, sur de fortes poutres;

bb *solives d'enchevêtrure;* elles peuvent reposer comme les précédentes;

cc *solives d'enchevêtrure boiteuses;* une de leurs extrémités repose comme pour les précédentes, mais l'autre est assemblée à tenon et mortaise dans un chevêtre ou un linçoir;

dd *chevêtres.* Leurs extrémités sont assemblées dans les solives d'enchevêtrure; quelquefois une seule extrémité est ainsi assemblée, l'autre repose sur le mur. Ils supportent les extrémités des solives de remplissage. On en fait usage non-seulement quand on manque de solives d'une longueur suffisante, mais aussi pour laisser vide l'espace occupé par une cheminée ou un escalier;

ee *faux chevêtres.* Ce sont des chevêtres placés derrière d'autres, pour remplir l'espace entre un vrai chevêtre et le mur;

f *linçoir.* Pièce de bois dans laquelle on assemble les solives qui correspondent aux fenêtres et portes des murs de face, ou aux tuyaux de cheminées des murs de refend. On appelle aussi *linçoir*, une pièce de peu de longueur, telle que la pièce *g*, qui s'assemble dans un chevêtre à une extrémité, repose sur le mur par l'autre, et qui reçoit l'assemblage d'un faux chevêtre. On appelle encore *linçoir*, la pièce qui reçoit les abouts des chevrons d'une charpente, en face d'une lucarne ou d'un tuyau de cheminée;

hh *soliveaux.* Ce sont des petites solives assemblées entre un ou deux chevêtres ou linçoirs, et qui remplissent l'espace libre à côté d'une cheminée ou d'un passage de cheminée;

ii *entretoises;*

k place d'un âtre;

k' passage d'un tuyau de cheminée;

k'' passage d'un escalier.

334. ***Ordonnances relatives aux positions que doivent occuper les différentes pièces d'une charpente de plancher par rapport aux âtres des cheminées, aux tuyaux passant des étages inférieurs, et aux vides des portes et croisées des étages inférieurs:***

1° Écarter les solives d'enchevêtrure de $0^m,325$ de plus que le dedans-œuvre des jambages des cheminées de moyenne grandeur, ou, tout au moins, les tenir de $0^m,027$ de chaque côté plus espacées que le dedans-œuvre des grandes cheminées;

2° Laisser 1m,14 de distance depuis le fond du vide de l'âtre jusqu'au devant du chevêtre qui porte les solives de remplissage. S'il y a des tuyaux de cheminées passant derrière l'âtre, la distance de 1m,14 se compte à partir du dedans de la languette qui recouvre le contre-cœur ;
3° Faire un recouvrement de 0m,162 d'épaisseur sur toutes pièces de bois, chevêtres, linçoirs, solives d'enchevêtrure, pour les séparer de l'intérieur des tuyaux de cheminées. Pour soutenir ce recouvrement, on implante dans les pièces de bois des chevilles en fer ou des clous de bateaux ;
4° Ne faire en bois aucun manteau de cheminée, ni adosser les tuyaux de cheminées contre des cloisons en charpente ; ne pas poser les âtres sur des solives en bois, et ne placer aucune pièce de bois dans les tuyaux de cheminées ;
5° Éviter surtout de mettre au-devant de trois tuyaux passants un linçoir commun, qui aurait peu de solidité à cause de sa trop grande portée ; mettre entre le second et le troisième tuyau une enchevêtrure scellée dans le mur, en ayant soin de laisser, comme il est prescrit, 0m,126 de recouvrement en maçonnerie, de part et d'autre de l'enchevêtrure, jusqu'au dedans-œuvre des tuyaux.

555. *Dimensions des pièces de la charpente des planchers.* Les solives d'enchevêtrure, en raison du poids considérable qu'elles supportent (elles soutiennent non-seulement les jambages et les âtres des cheminées, à l'aide de bandes de fer formant trémie, mais aussi les chevêtres et les linçoirs), doivent être scellées de 0m,22 à 0m,25 dans les murs. Chacune des dimensions transversales de ces solives doit avoir au moins 0m,027 de plus que les solives ordinaires ou de remplissage.

Les tenons des chevêtres et des linçoirs se renforcent en taillant en congé un petit pan incliné dans l'angle rentrant de la face supérieure du tenon, et même, si la longueur de ces pièces atteint 1m,50 à 2 mètres, et qu'elles supportent des solives de remplissage d'une certaine longueur, il convient de soulager leurs tenons à l'aide d'étriers en fer qui passent sous leurs extrémités et viennent se clouer sur les solives d'enchevêtrure. Quand les linçoirs sont placés le long d'un mur, on peut remplacer les étriers par des corbeaux en fer scellés dans le mur.

Au lieu de sceller les solives dans les murs, ce qui a l'inconvénient de diviser ces derniers, on les supporte quelquefois par des pièces de bois appliquées contre les murs, comme l'indique en coupe la figure 8, planche III. Ces pièces, que l'on appelle *lambourdes*, sont scellées par leurs extrémités dans les murs en retour, et soutenues en différents points de leur longueur par des corbeaux en fer fixés dans les murs qu'elles longent. Quand on veut que les lambourdes jouissent d'une plus grande solidité, on les encastre d'environ la moitié de leur largeur dans les murs qu'elles longent. Lorsque l'assemblage des solives aux lambourdes a besoin d'une grande solidité, on le fait à queue d'aronde à recouvrement, en donnant au recouvrement environ le 1/3 de la dimension verticale de la lambourde, et les 2/3 à la queue d'aronde. Suivant la largeur de la lambourde, en divisant cette largeur en quatre parties égales, la partie le long du mur n'est pas entaillée, la queue

d'aronde occupe les deux portions du milieu, et l'autre partie porte une entaille de la largeur de la solive. Comme, par ce dernier mode d'assemblage, la lambourde fait saillie au-dessous des solives, on y fixe la corniche du plafond.

La dimension verticale des solives ordinaires étant 1, la même dimension des lambourdes serait 1,5 et leur dimension horizontale 1. Ainsi pour une pièce de $4^m,55$ dans œuvre, les solives ayant $0^m,19$ de hauteur, on donnerait aux lambourdes $0^m,285$ de hauteur sur $0^m,19$ de largeur.

Lorsque les solives doivent avoir des longueurs trop grandes, on a recours aux poutres. Dans les constructions grossières, on repose simplement les solives sur les poutres, qui alors font saillie de toute leur hauteur sous la face inférieure des solives. Dans le cas où l'on veut établir un plafond et cacher les poutres, on est obligé de placer des petites pièces de remplissage en bois au niveau de la face inférieure des poutres, pour y clouer les lattes du plafond. Afin de diminuer l'épaisseur considérable de plancher qu'entraîne cette disposition, il convient d'appliquer contre chaque face latérale de la poutre une lambourde qui effleure sa face inférieure, et de fixer les solives à ces lambourdes, comme il a été indiqué plus haut pour le cas où les lambourdes sont appliquées contre les murs. Les lambourdes sont scellées dans les murs, et soutenues de distance en distance par des étriers communs aux deux lambourdes et mis à cheval sur la poutre. Quelquefois encore la poutre elle-même fait l'office de lambourde; mais, afin que ses faces latérales soient inclinées sans enlever le bois, on donne, dans toute la longueur de la pièce de bois, un trait de scie incliné à ses faces supérieure et inférieure, et on place les deux lambourdes qui en résultent l'une à côté de l'autre, en les réunissant par quelques boulons.

On peut encore faire, à l'aide seulement de pièces d'une faible longueur, des planchers d'une grande étendue, en disposant ces pièces de manière qu'elles reposent les unes sur deux murs en des points voisins d'un angle, les autres sur un mur par une extrémité et sur une pièce par l'autre, et les autres sur une pièce par chaque extrémité. On conçoit que ces charpentes demandent à être faites avec beaucoup de soin, et que le système reposant sur quelques tenons, on peut considérer la solidité comme problématique si on ne met pas un étrier en fer à chaque tenon.

D'après Rondelet, on doit donner à chaque solive des planchers de maisons d'habitation 1/24 de leur longueur quand elles sont espacées tant vide que plein, et plus quand l'écartement augmente. La largeur des solives ne doit pas être moindre que la moitié de la hauteur (2/5), à moins qu'on ne place des fourrures ou des liernes pour les empêcher de gauchir. Quant aux poutres, il conseille de leur donner pour équarrissage 1/18 de leur portée quand elles sont espacées de 3 mètres à $3^m,50$,

ce qui se rapproche assez des dimensions que donnerait la formule $\frac{pL^2}{8}=\frac{Rbh^2}{6}$ du n° 220, dans laquelle p, charge par mètre de longueur de la pièce, serait calculée à raison de 200 kilogrammes par mètre carré de surface (une poutre peut même se trouver momentanément chargée d'un poids supérieur quand il y a un grand nombre de personnes en mouvement dans la pièce qu'elle supporte, n° 557); $R = 600\,000$ (n° 215), et $b = h$, car les poutres ont ordinairement une section transversale carrée, afin de ne pas les affaiblir en coupant les fibres pour les rendre méplates.

Le tableau suivant donne les Dimensions des poutres et des solives de planchers d'après Bullet, *et rapportées par* M. Emy *comme étant aujourd'hui en usage dans les bâtisses ordinaires.*

POUTRES.		SOLIVES DE BRIN.			SOLIVES DE SCIAGE.		
Long.	Équarrissage.	Long.	Équarrissage.	Écart.	Longueur.	Équarrissage.	Écart.
m 3.90	m 0.27 sur 0.32						
4.87	0.30 0.36						
5.85	0.33 0.40						
6.82	0.35 0.44				m. 4.87	m. m 0.16 sur 0.22	
7.80	0.37 0.48				5.85	0.22 0.25	
8.77	0.41 0.51						
9.75	0.43 0.56	de m. 2.92 à m. 4.87	m. m. 0.14 sur 0.19	m 0.16	m. m. 7.80 à 8.12	0.24 0.27	m. 0.22
10.72	0 46 0.59						
11.70	0.49 0.62				m 8.77	0.27 0.30	
12.68	0 51 0.65						
13.64	0.54 0.68						

Tredgold donne la formule suivante pour calculer les dimensions des solives et des poutres :

$$h = K\sqrt[3]{\frac{l^2}{b}}.$$

h hauteur de la pièce en mètres ;
b largeur *id* *id.;*
l portée de la pièce *id.;*
K coefficient qui prend les valeurs suivantes :

1° *Pour les planchers simples*, à un seul rang de solives, sans que b puisse être inférieur à 0m,05, $K = 0{,}0363$ si les solives sont en sapin, et $K = 0{,}0376$ si elles sont en chêne ;

2° *Pour les planchers assemblés*, les poutres principales, sans que leur écartement excède 3 mètres, exigent que l'on fasse $K = 0{,}0688$ ou 0,0711, suivant qu'elles sont en sapin ou en chêne.

Pour les petites poutres transversales assemblées aux poutres principales, distantes au plus de $1^m,30$ à 2 mètres, K = 0,0560 pour le sapin et K = 0,0578 pour le chêne.

Les dimensions des solives supérieures se règlent comme au 1°.

Enfin pour les solives inférieures qui ne servent qu'à fixer les lattes, sans prendre b supérieur à $0^m,05$, on fait K = 0,0104 ou 0,0109, suivant que l'on emploie le sapin ou le chêne.

Pour les poitrails de boutiques (552), on est dans l'usage de refendre en deux les pièces de bois qui servent à les former, d'en écarter les deux parties de $0^m,05$ à $0^m,06$ par des fourrures, et de les relier par des boulons. L'augmentation de largeur que l'on donne ainsi aux poitrails fait qu'il est plus facile d'y reposer les murs; de plus, le bois refendu perd facilement son humidité naturelle, qu'il aurait conservée en partie sans cette précaution, ce qui en aurait accéléré la pourriture.

Il y a encore un cas où on refend une poutre : c'est celui où, ne disposant pas de bois d'une assez forte dimension, on est obligé d'avoir recours aux poutres armées. Dans ce cas, on refend la pièce de bois et on en écarte les deux parties, entre lesquelles on place deux pièces de bois qui forment un triangle isocèle dont la poutre est la base. La hauteur de ce triangle est faible, afin que le dessus des armatures ne dépasse pas le haut des lambourdes sur lesquelles reposent l'aire en plâtre et le parquet. Un boulon allant du sommet du triangle au milieu de sa base rend tout le système solidaire et lui donne une grande rigidité.

Pour les édifices tels que les magasins à blé, entrepôts, etc., il est impossible de donner une règle empirique pour déterminer les dimensions des poutres, solives et autres pièces des planchers; on est obligé d'avoir recours aux formules relatives à la résistance des matériaux (n°s 215 et suivants).

556. *Pose du carrelage ou du parquet et plafond*. Pour terminer le plancher, si on laisse les solives apparentes, ce que l'on peut faire dans un atelier par exemple, on place dessus des recoupes de débris de bois appelées *bardeaux*, ou, pour plus d'économie, des lattes jointives. Sur ces bardeaux ou sur ce lattis on place une couche de plâtre de $0^m,04$ à $0^m,05$ d'épaisseur, qu'on laisse se raffermir; puis on applique en dessous, entre les solives, une deuxième couche de plâtre, qui peut être moins épaisse que la couche supérieure sur laquelle on pose le carrelage; ces plafonds partiels s'appellent *entrevous*.

Cette disposition ne peut convenir pour des lieux habités. Dans ce cas, on fait les planchers pleins ou creux. Pour les premiers, qui transmettent peu le bruit d'un étage à un autre, on commence par fixer un lattis sous les solives; sur ce lattis, on fait, comme pour les pans de bois (552), un hourdis que l'on élève jusqu'au niveau de la face supérieure des solives, et sur la surface qui en résulte on étend une couche de plâtre sur laquelle on établit le carrelage. Sous le lattis on fait un

gobetage, puis un crépi, en appliquant le plâtre à l'aide de la taloche, et enfin l'enduit plus ou moins soigné qui doit terminer le plafond, dont l'épaisseur ne dépasse pas 0m,03.

Au lieu d'un hourdis qui remplit complétement les vides laissés entre les solives, on se contente quelquefois, après avoir fixé le lattis inférieur, de placer dessus, entre les solives, une couche plus ou moins épaisse de plâtre. Ces couches de plâtre, séparées entre elles par les solives, sont ce que l'on appelle des *augets;* on en rend la surface concave afin d'augmenter leur surface de contact avec les solives, et des petits clous de peu de valeur, que l'on nomme *rappointis*, implantés dans les solives à l'endroit des augets, augmentent l'adhérence de ceux-ci avec les solives. Ces augets ajoutent considérablement à la solidité des plafonds, qui, sans cela, sont sujets à se fendiller et à se détacher du lattis. Une fois les augets terminés, on établit un lattis tant plein que vide sur les solives, et sur ce lattis on étale une couche de plâtre de 0m,04 à 0m,05 d'épaisseur pour y reposer le carrelage.

Quand on ne craint pas que le bruit d'un étage se fasse trop entendre à l'étage inférieur, on fait le plancher creux, c'est-à-dire qu'on supprime le hourdis et les augets entre les solives. Les lattis inférieur et supérieur sont tant plein que vide; sous le premier on établit le plafond, et sur le second la couche de plâtre sur laquelle repose le carrelage.

Quand au lieu d'un carrelage on veut établir un parquet, si les solives sont toutes de niveau à leur partie supérieure, on peut faire reposer directement le parquet sur les solives, mais généralement on établit une couche de plâtre de 0m,04 sur le lattis supérieur; sur cette couche de plâtre on place des *lambourdes*, pièces de bois de 0m,067 de hauteur sur 0m,05 de largeur, et c'est sur ces lambourdes que l'on repose le parquet. On remplit les vides entre les lambourdes avec une matière sèche. Quelquefois on repose directement les lambourdes sur le lattis, et on se contente de les relier par des augets en plâtre reposant sur le lattis.

557. *Planchers en fer.*

Depuis quelques années, on substitue très-souvent le fer au bois dans la construction des planchers, on peut presque dire que c'est ce que l'on fait exclusivement aujourd'hui à Paris.

Les solives sont en fer double T; on les espace de 0m,80 à 1 mètre; elles sont engagées de 0m,20 à 0m,25 dans les murs et y sont retenues par des harpons et ancres; leur hauteur est ordinairement comprise entre le 1/30 et le 1/35 de leur longueur, et on leur donne environ 1/200 de flèche avant la pose. Les solives sont reliées entre elles par des entretoises en fer carré qui s'agrafent dans les murs et sur les solives; quelquefois les entretoises sont en fer rond et boulonnées; dans tous les cas elles sont perpendiculaires aux solives, et espacées entre elles de 0m,80 à 0m,90. Sur les entretoises, parallèlement aux solives, on accroche des *fan-*

tons, petites tringles en fer carré de $0^m,010$ à $0^m,011$ de côté, qui se recourbent à angle droit pour descendre au niveau de la face inférieure des solives. Les fantons sont espacés de $0^m,25$ environ, et c'est sur le treillage qu'ils forment que l'on exécute le hourdis, soit en plâtras secs, soit en briques creuses, soit en poterie; ces deux dernières matières ont l'avantage de donner des planchers secs, légers, résistants, et communiquant peu le bruit d'un étage à l'autre.

Le plafond s'exécute sans lattes sous le hourdis. Si le plancher est plein, on peut poser le carrelage dessus directement; dans le cas contraire on le pose sur une aire en plâtre faite sur un lattis reposant sur les solives. Les parquets peuvent se poser directement sur le hourdis; mais ordinairement on les fixe sur des lambourdes.

Les dimensions des solives se calculent à l'aide de la formule du n° 220 relative à une pièce reposant sur deux appuis et chargée uniformément sur toute sa longueur :

$$\frac{pL^2}{8} = \frac{RI}{n},$$

p charge par mètre de longueur de la pièce, p comprend le poids du plancher (page 726), et la surcharge, qui peut être accidentellement de 4 personnes ou de 280 kilog. par mètre carré de plancher. La pratique semble avoir confirmé qu'en prenant en moyenne 280 kilog. pour la charge totale par mètre carré, ce qui correspond à une surcharge d'une personne par mètre carré, on obtient une résistance suffisante; cela est dû à l'augmentation de rigidité produite par la liaison des différentes pièces par le hourdis, et aux encastrements dans les murs;

R, que l'on peut faire égal à 6 000 000, L, n et I ont les significations du n° 215.

TABLEAU des dimensions des profils des différents fers en double **T**, *à angles arrondis, des usines de la Providence et de Montataire ; des poids par mètre courant de ces fers, et des valeurs de $\frac{I}{n}$ calculées par M. Morin.*

Les nervures étant les mêmes, on a $n = \frac{h}{2}$.

DÉSIGNATION.	VALEUR DE (*fig.* 40)				POIDS par mètre.	VALEUR DE $\frac{I}{n}$
	h	h'	b	$b-b'$		
	m.	m.	m.	m.	k.	
Providence.	0.100	0.088	0.043	0.005	9.00	0.00002850
			0 045	0.007	12.00	0.00003184
Montataire.	0.100	0.085	0.042	0.010	8.06	0.00003725
			0.047	0.015	11.56	0.00004560
Providence.	0.120	0.106	0.045	0.004	11.00	0.00004018
			0.050	0.009	15.00	0.00005218
Montataire.	0.120	0.104	0.047	0.005	10.00	0.00004551
			0.050	0.010	14.28	0.00005751
Providence.	0.140	0.126	0.047	0.006	14.00	0.00005590
			0.053	0.012	20.00	0.00007546
Montataire.	0.140	0.123	0.050	0.007	13.00	0 00007803
			0.055	0.012	18.00	0.00008454
Providence.	0.160	0.144	0.043	0.007	15.00	0 00007727
			0.053	0.012	25.00	0.00009860
Montataire.	0.160	0.142	0.055	0.007	16.50	0.00011519
			0.062	0.014	25.00	0.00013031
Providence.	0.180	0.162	0.055	0.008	20.00	0.00011198
			0.062	0.015	30.00	0.00014978
Montataire.	0.180	0.162	0.060	0.008	20.00	0.00011925
			0.067	0.015	30.00	0.00015709
Montataire.	0.200	0.181	0.065	0.008	22.00	0.00015167
			0.073	0.016	34.40	0.00020500
Providence.	0.220	0.200	0.064	0.009	26.00	0.00018224
			0.071	0.016	40.00	0.00023871
Montataire.	0.220	0.201	0.065	0.008	24.30	0.00017366
			0.073	0.016	37.40	0 00023820
Providence.	0.260	0.236	0.067	0.013	40.00	0.00029974
			0.074	0,020	58.00	0.00037860

Pour des solives espacées de $0^m,80$, c'est-à-dire pour $p = 280 \times 0,80 = 224$ kilog., si la portée $L = 5^m,00$, la formule précédente donne

$$\frac{I}{n} = \frac{224 \times 25}{8 \times 6000000} = 0,00011667.$$

Ce qui indique que le fer de Montataire dont $h = 0^m,16$ et pesant $16^k,50$ le mètre pourra être employé.

M. Moitié, de Coulommier, architecte, à l'occasion de constructions qu'il a fait établir rue de Valois et rue de Grenelle Saint-Germain, a fait une étude comparative des planchers en bois avec les planchers en fer; les tableaux suivants contiennent les résultats qu'il a obtenus, et qu'il a bien voulu nous communiquer. (Dans ces tableaux, les poids sont exprimés en kilogrammes, les dimensions en mètres et les prix en francs).

1° *Planchers en bois de 10m.50 de largeur, établis avec 4 enchevêtrures, 10 chevêtres et 28 solives de remplissage; avec étriers, harpons, ancres, chevêtres en fer et bandes de trémie, et dont le hourdis est maintenu par des clous à bateaux et rappointis.*

DÉTAILS.	Portée du plancher.	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
Surface du plancher		31.50	36.75	42.00	47.25	52.50	57.75	63.00
Enchevêtrures	Longueur	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
	Section	0.20×0.20	0.21×0.21	0.22×0.21	0.24×0.22	0.25×0.24	0.27×0.25	0.32×0.30
	Volume des 4	0.500	0.706	0.832	1.104	1.254	1.610	2.490
Chevêtres	Longueur totale	21.35	21.30	21.20	21.05	20.90	20.75	20.85
	Section	0.20×0.18	0.21×0.10	0.22×0.20	0.22×0.22	0.25×0.22	0.25×0.24	0.30×0.25
	Volume des 10	0.760	0.850	0.933	1.065	1.140	1.245	1.574
Solives	Longueur	1.75	2.25	2.75	3.25	3.40	4.25	4.45
	Section	0.15×0.08	0.10×0.08	0.17×0.08	0.10×0.08	0.20×0.09	0.23×0.10	0.25×0.12
	Volume des 28	0.588	0.806	1.047	1.383	1.710	2.737	3.492
Cube total de bois		1.917	2.370	2.812	3.552	4.113	5.592	7.945[a]
— par mètre superficiel de plancher		0.0608	0.0645	0.0693	0.0751	0.0814	0.0960	0.120
Prix du stère de bois		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	110.00
Prix par mètre carré de plancher	du bois	6.08	0.45	6.03	7.51	8.14	0.00	13.80
	des ferrements	1 25	1.30	1.40	1.45	1.50	1.00	2.25
	du plafond en plâtre sur lattis espacé de 0m.10, avec augets et aire en plâtre sur bardeaux	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
	Total, non compris le parquet	11.83	12.25	12.83	13.40	14.14	15.70	20.01
Poids du mètre carré, *id.*		158.00	103.00	167.00	174.00	180.00	187.00	224.00
Épaisseur du plancher, *id.*		0.25	0.25	0.27	0.28	0.30	0.30	0.35

[a] Dans ce cube est compris celui 0m.383 d'un cours de moises de 0m.15 sur 0m.25 de section, et de 10m.20 de longueur.

2° *Planchers en fer de 10m.50 de largeur, établis avec solives à double T, entretoises et fantons; avec harpons et ancres, et hourdis fait plein à augets de 0m.10 d'épaisseur en plâtras secs et sains et plâtre, avec plafond enduit dessous.*

DÉTAILS.	Portée du plancher.	3.00	3.50	4.06	4.50	5.00	5.56	6.00
Surface du plancher		31.50	36.75	42.00	47.25	52.50	57.75	63.00
Solives.	Espacement	0.86	0.80	6.86	6.80	6.86	6.75	0.75
	Nombre	12.	12.	12.	12.	12.	13.	13.
	Longueur	3.40	3.96	4.40	4.90	5.40	5.00	0.56
	Hauteur	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.10	0.10
	Poids par mètre	12.06	13.00	14.00	15.00	10.00	20.00	25.00
	Poids total	480.00	608.40	728.00	882.00	1036.86	1534.06	2212.00
Entretoises.	Espacement	0.80	0.80	6.86	6.80	0.86	0.80	6.75
	Nombre	42.	52.	52.	65.	65.	84.	112.
	Longueur développée	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.15	1.25
	Côté de la section, qui est carrée	0.614	0.014	0.614	0.014	6.614	6.014	6.614
	Poids par mètre	1.52	1.52	1.52	1.02	1.52	1.52	1.52
	Poids total	76.61	94.45	94.45	118.50	118.56	146.84	212.60
26 cours de fautons (*a*).	Longueur, y compris scellements et agrafes	3.56	4.06	4.50	5.00	5.50	6.06	6.30
	Côté de la section, qui est carrée	0.01	6.01	6.01	6.01	0.01	0.61	0.01
	Poids du mètre courant	0.77	6.77	0.77	6.77	6.77	6.77	6.77
	Poids total	70.07	80.08	90.08	100.10	100 50	120.30	203.74
Poids des 8 harpons fixés avec boulons, et des 8 ancres de 6m.80 de longueur en fer carré de 0m.03 de côté		68.80	08.80	68.86	68.80	68.80	68.80	80.00
Poids total de fer		705.08	851.73	081.33	1100.46	1333.66	1870.00	2708.54
Poids de fer par mètre carré de plancher		22,383	23.258	23.364	24.75	26.400	32.530	42.01
Prix par mètre carré de plancher	du fer, à raison de 56 fr. les 100 kilog.	11.19	11.03	11.68	12.38	13.20	10.27	21.45
	du hourdis à augets de 0m.10 d'épaisseur.	1.56	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.60
	de l'enduit du plafond en plâtre	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.06	2.00
	total, non compris le parquet	14.09	15.13	15.18	15.88	16.75	10.77	25.05
Poids du mètre carré, *id.*		180.60	102.60	103.00	190.00	106.66	106.06	211.00
Épaisseur du plancher, *id.*		6.14	6.14	0.16	0.16	6.16	0.16	6.18

(*a*) Dans les planchers de 6 mètres de portée, il y a 42 cours de fautons; et comme les entretoises ont été espacées de 0m.75 au lieu de 0m.80, comme cela a lieu ordinairement, il en résulte que chacune des 14 travées formées par les solives contient 8 entre-toises.

Devis du plancher de $6^m,00$ de portée établi d'après le système de M. Rosier.

13 solives en fer, semblables à celles du tableau précédent, $2212^k,50$, à $0^f,50$ le kilog.	$1106^f,25$
9 cours de boulons en fer de $0^m,014$ de diamètre, et de $10^m,80$ de longueur y compris scellements aux extrémités, avec écrous simples et doubles ; le tout $97^m,20$, à $1^k,25$ le mètre, pèse $121^k,50$, à $0^f,75$ le kilo.	91,12
15 cours de soliveaux en chêne de sciage, dressés sur toutes faces, de chacun $10^m,00 \times 0,05 \times 0,16$, cubent $1^{st},200$, à $130^f,00$ le stère	156,00
30 cours de tasseaux pour porter le bardeau, ensemble $300^m,00$, à $0^f,25$.	75,00
Le bardeau compris entre les solives, 2/3 de la surface, c'est-à-dire $42^m,65$, à $0^f,80$ le mètre.	34,12
Le plafond sur lattis espacé de $0^m,10$ avec augets au-dessus, produisent $63^m,00$, à $3^f,00$ le mètre.	189,00
L'aire au-dessus, faite en plâtre, de $0^m,04$ d'épaisseur, même surface, à $0^f,75$ le mètre.	47,25
Total.	$1698^f,74$
Prix du mètre carré de plancher, sans parquet.	26,70
Poids *id.*	$145^k,00$
Épaisseur du plancher *id.*	$0^m,18$

Devis du même plancher de $6^m,00$ de portée et $63^m,00$ de surface hourdé en poterie, et construit avec des fermettes espacées de $0^m,75$ et composées d'un arc et d'une corde en fer plat ou rond, avec brides et entretoises.

Détail d'une ferme :

Arc en fer de $0^m,068 \times 0^m,014 \times 6^m,25$.	»
Corde » de $0^m,054 \times 0^m,014 \times 6^m,50$.	»
7 brides » de $0^m,054 \times 0^m,011 \times 3^m,50$.	»
Cales et fourrures $0^m,054 \times 0^m,014 \times 0^m,60$.	»
Poids total d'une ferme. . .	$103^k,36$
Poids des 13 fermes.	$1343^k,68$
A $68^f,00$ les 100 kil.	$913^f,70$
Pour chacune des 14 travées, 6 entretoises contre-coudées à double agrafe, fer de $0^m,030 \times 0,009 \times 1^m,45$, ensemble $8^m,70$, à $2^k,10$ le mètre, $18^k,27$.	
Pour les 14, $255^k,78$, à $55^f,00$ les 100 kil..	$140^f,68$
8 ancres en fer de $0,030 \times 0,030 \times 0,80$, ensemble $6^m,40$, à 7 kil. le mètre, $44^k,80$.	
— à $50^f,00$ les 100 kilog.	22,40
3 cours de fantons, en fer carré de $0^m,011$ de côté, dans chaque travée. Pour les 14 travées, 42 fantons pesant $250^k,83$, à 40 fr. les 100 kilog.	100,33
62 mètres superficiels de poterie, de $0^m,22$ de hauteur, hourdée en plâtre, à $12^f,60$ le mètre..	781,20
Crépis et enduits du plafond, cintrage, etc., à 2 fr. le mètre.	126,00
Prix total du plafond, sans parquet.	$2084^f,31$
Prix du mètre carré, sans parquet.	33,08
Poids du mètre carré, sans parquet.	142^k.
Épaisseur du plancher.	$0^m,28$

ENDUITS.

558. *Enduits.* Dans les intérieurs, les enduits se font en plâtre comme les plafonds (557). Les enduits en mortier se posent à la truelle, et on les dresse avec une taloche de 0m,15 sur 0m,20. Les enduits en ciment romain se posent à la truelle et se dressent avec le tranchant de cet outil. Lorsque les enduits sont apparents, après la taloche ou la truelle on passe la truelle bretée pour terminer la surface (551).

L'application des enduits en mortier hydraulique se fait principalement sur l'extrados des voûtes et sur les murs de soubassement, afin de préserver la maçonnerie de l'humidité et des infiltrations d'eau; on recouvre également de ces enduits tous les murs et radiers de réservoirs, de citernes, de fosses, d'aqueducs, etc.

Les mortiers préférables pour l'exécution de ces enduits sont ceux de chaux hydraulique, et surtout ceux de ciment romain; la prompte solidification de ces derniers à l'air et dans l'eau, et leur degré d'imperméabilité, leur donnent une supériorité incontestable sur tous les autres, surtout lorsqu'il s'agit de résister à la pression d'un liquide (529).

Lorsque l'enduit doit être appliqué sur une maçonnerie neuve hourdée en mortier de chaux, si les parements sont assez bruts pour présenter des aspérités suffisantes pour retenir l'enduit, l'ouvrier commence par dégrader légèrement les joints si l'enduit est en mortier de chaux, et très-profondément s'il est en mortier de ciment, afin qu'on puisse tous les garnir d'un rocaillage, surtout si la maçonnerie est en moellons. Ce dégradage fait, l'ouvrier brosse et mouille les parements pour augmenter l'adhérence de l'enduit.

S'il s'agit au contraire d'une vieille construction dont les parements sont trop unis et couverts de matières nuisibles à l'adhérence du mortier, ou d'une maçonnerie hourdée en plâtre ou en mortier de terre, on dégrade d'abord les joints profondément et carrément, puis on pique à la pioche les matériaux, afin de priver les parements de toutes les parties altérées et y faire des aspérités. Cela fait, on nettoie parfaitement les parements en les frottant d'abord à sec avec des balais très-durs, et en les lavant ensuite à l'eau au moyen de brosses ou de balais, jusqu'à ce qu'ils soient entièrement dépourvus de poussière, qui aurait diminué l'adhérence de l'enduit.

Pour les parements supérieurs horizontaux, comme lorsqu'il s'agit de radiers, le nettoyage offre plus de difficultés; l'ouvrier éprouve beaucoup de peine pour retirer avec la brosse et la pointe de la truelle tous les détritus qui se logent dans les petites cavités provenant du dégradage. Cependant, le soulèvement des enduits de radiers provenant presque toujours de leur défaut d'adhérence avec la maçonnerie, défaut

dû ordinairement aux détritus non enlevés, on conçoit l'importance d'un nettoyage parfait.

On nettoie très-bien les parements lorsqu'il y a possibilité de projeter de l'eau dessus avec une pompe foulante; par sa grande vitesse, l'eau détache et entraîne la poussière, les matières terreuses et les parcelles de mortier et de pierre ébranlées lors du dégradage.

Le dégradage et le lavage des parements étant terminés, on commence par remplir les plus grands joints d'un rocaillage, puis on procède à la pose de l'enduit (*Art.* 177).

559. *Rejointoiement.* Il s'opère en creusant les joints avec un crochet jusqu'à une profondeur de 2 à 3 centimètres, en les nettoyant avec soin au moyen d'une brosse dure ou d'un balai, en les arrosant au besoin, et en les remplissant de mortier que l'on presse bien avec la truelle.

La surface vue des joints peut être plate et effleurer le nu du parement; c'est ce que l'on fait pour les pierres tendres, afin de préserver les arêtes, et aussi pour les briques. Ces joints plats se lissent souvent avec une tige recourbée en fer, appelée *tire-joints*, que l'on fait glisser le long d'une règle.

Les maçonneries de moellons bruts ou smillés se font quelquefois à joints plats, ou encore à joints arrondis en creux, mais le plus souvent on les fait en boudin. Les joints de cette dernière forme, qui conviennent surtout pour les pierres de taille dures, résistent mieux aux actions de la pluie et de la gelée, et le dégagement des arêtes de la pierre donne de plus aux parements un aspect de solidité et de beauté parfaitement en harmonie avec cette espèce de maçonnerie.

560. *Corniches en plâtre et moulures de lambris.* Pour faire une corniche en plâtre, on commence par former à la place qu'elle doit occuper une masse de plâtre dont la saillie soit un peu moindre que celle de la corniche, des rappointis assurent la fixité de cette masse; puis on fixe une règle bien droite contre le mur, au bas de la corniche et parallèlement à cette corniche. Cela fait, on applique une couche convenable de plâtre clair contre la masse solide, et c'est avec cette couche de plâtre mou que l'on fait les moulures de la corniche, en passant dessus, à plusieurs reprises, un calibre en tôle ou en bois dont le pourtour est taillé suivant les formes des moulures. Afin que ce calibre soit bien guidé pendant la traîne de la corniche, on le fixe par une entaille sur le milieu d'une règle qui porte un angle rentrant. Un bâton oblique, dont une extrémité se fixe dans le calibre et l'autre dans la règle, donne une certaine solidité à leur ensemble. Par cette disposition, en faisant glisser le calibre sur la couche de plâtre, de manière que l'angle rentrant de sa règle suive bien l'angle saillant de la règle fixée contre le mur, on est sûr d'obtenir une corniche bien droite (*Art.* 315).

On suit une marche semblable pour faire les moulures des lambris.

561. *Blanc en bourre.* Quand on n'a pas de plâtre, on fait usage,

pour les plafonds et enduits, de *blanc en bourre*, mortier de terre argileuse et de 1/5 à 1/6 de chaux grasse, auquel on a mélangé de la bourre.

Il faut éviter d'employer le blanc en bourre pendant les temps de gelée.

La chaux doit être éteinte depuis plusieurs mois, afin que l'on soit sûr qu'aucune particule n'a échappé à l'extinction; sans quoi, après la confection de l'enduit, le poli s'altérerait.

562. *Stucs*. On fait souvent usage d'un marbre artificiel appelé stuc. On distingue :

1° Le *stuc en chaux*, obtenu en mélangeant en parties égales de la chaux et du marbre en poudre tamisé; on le pose en couche mince, sur une première couche en plâtre mélangé à un mortier de chaux et de sable fin.

2° Le *stuc en plâtre*, qui n'est autre chose que du plâtre bien pur gâché avec une eau dans laquelle on a fait fondre de la colle de Flandre.

Le stuc en plâtre ne peut s'employer qu'à l'intérieur; mais celui à la chaux peut s'appliquer à l'extérieur, en ayant soin de faire l'ébauche ou les premières couches entièrement en mortier de chaux hydraulique.

Si on veut donner au stuc en plâtre un aspect de marbre veiné, on incruste dans la masse des veines faites avec du plâtre gâché colorié à l'aide de la couleur que l'on veut obtenir (*Art.*).

COMBLES.

563. *Combles*. C'est la construction que l'on fait pour préserver de la pluie les parties intérieures d'un édifice.

Quelquefois un comble est assez peu incliné pour qu'on puisse y marcher assez facilement, il prend alors le nom de *terrasse*.

Ordinairement un toit est formé de deux pans inclinés en sens contraire et se raccordant suivant une arête qui prend le nom de *faîte*.

Dans les édifices plus longs que larges, le faîte est parallèle à la longueur, et chacun des plans dont se compose le toit prend le nom de *long-pan*. Quand les longs-pans du toit se terminent aux murs latéraux de l'édifice, ces murs prennent le nom de *pignons*. Si le toit se termine par des portions de toit qui s'appuient sur les longs-pans et sur les murs latéraux, ces pans inclinés s'appellent *croupes*. Quand l'édifice est carré, les longs-pans et les croupes sont égaux et viennent se terminer à un sommet commun ; on a alors un toit en *pavillon*.

Quand on veut faire des logements dans les combles, les pans du toit sont formés de deux parties; l'une inférieure se rapprochant beaucoup de la verticale et dans laquelle on pratique les fenêtres des appartements, et une partie supérieure, plus inclinée et s'appuyant sur la première et sur le faîte. Ce sont les combles à la *mansarde*.

Quelquefois le comble est composé d'une seule pente, et prend le nom d'*appentis*, nom qui s'étend à tout l'édifice, si cet édifice reste

ouvert, ou si le comble n'est soutenu que par des poteaux ou des pilastres. Le faîte d'un appentis est généralement adossé à un des murs d'un édifice plus élevé.

564. *Fermes.* Comme les matériaux employés pour la couverture sont en petits échantillons et très-minces, pour les soutenir, on construit, tous les trois à quatre mètres, des assemblages solides, appelés *fermes*, dirigés suivant la largeur de l'édifice. Ces fermes sont quelquefois en maçonnerie, plus souvent en fer ou en fer et fonte, ou encore en fer et bois, mais ordinairement elles sont en bois.

On doit toujours placer les fermes à l'aplomb des trumeaux, c'est-à-dire des parties pleines qui séparent les portes et croisées de l'édifice.

565. *Noms des différentes pièces qui entrent dans la composition d'une ferme.*

Figure 9, planche III.

a *entrait* ou *tirant*. Pièce recevant les assemblages des arbalétriers, et celui du poinçon quand il n'y a pas d'entrait retroussé ;
b *entrait retroussé*. Il reçoit l'assemblage du poinçon et empêche les arbalétriers de fléchir sous leur charge ;
c *arbalétrier ;*
d *poinçon ;*
e *contrefiche ;*
ff *jambettes ;*
g *aisselier ;*
h *faîte ;*
h' *lien de faîte*. Petite jambe de force empêchant tout mouvement du poinçon par rapport au faîte ;
h'' *lierne*. Pièce destinée à relier les fermes entre elles ;
ii *pannes*. Leur distance varie de 2 mètres à $2^{m},30$; la panne qui se trouve à l'angle de deux parties qui composent un même pan de toit à la mansarde, prend le nom de *panne de brisis ;*
kk *tasseaux*. Quelquefois, entre le tasseau et la panne, on place un coussinet en bois, qui prend le nom de tasseau ; alors, le tasseau prend le nom de *chantignole ;*
l *sablière ;*
m *blochet ;*
n *chevrons*. Pièces de 9 à 11 centimètres d'équarrissage, éloignées entre elles de $0^{m},40$ à $0^{m},45$, et supportant la volige ou le lattis sur lequel on pose la couverture proprement dite ;
o *coyau ;*

On appelle *chanlate*, une pièce de bois, dont la section est un triangle rectangle, qu'on place au pied des chevrons pour recevoir un égout pendant.

566. *Dimensions des différentes pièces d'une ferme.* C'est toujours avec le plus grand soin qu'un ingénieur doit étudier les fermes des combles. Par une heureuse disposition, il peut réduire les dimensions des pièces qui les composent, et par suite en diminuer le prix et le poids, tout en obtenant une rigidité plus grande, ce qui n'ajoute pas peu à la solidité des murs (n° 475, page 608).

***TABLEAU** des équarrissages, en centimètres, des différentes pièces qui composent les fermes de diverses formes et de différentes portées* (extrait du *Cours de construction de l'école de Metz*). La disposition 27/24, par exemple, indique que la section de la pièce a 27 centimètres pour la dimension perpendiculaire à la dimension horizontale, et 24 centimètres pour cette dernière.

DÉSIGNATION DES FERMES.	Largeur du bâtiment, dans œuvre.	Tirant ne portant pas de plancher.	Le tirant portant un plancher.	Entrait retroussé.	Jambes de force.	Arbalétriers.	Poinçon.	Contrefiches et jambettes.	Aisseliers.	Faîte.	Liens de faîte.	Pannes, tasseaux et chantignolles.	Liernes.	Sablières.	Blochets.	Chevrons.	Coyaux.	Chanlate.
Ferme simple.	6m	27/24	32/27	»	»	22/10	10/10	16/16	»	19/16	15/15	10/19	»	12/23	»	0/0	8/7	16/3
	9	33/30	40/32	»	»	23/24	24/24	10/19	»	20/17	16/16	20/20	»	14/25	»	10/10	0/8	18/4
	12	40/36	47/37	»	»	32/30	30/30	21/21	»	22/10	17/17	22/22	»	16/28	»	11/11	10/0	20/5
Ferme à entrait retroussé, et arbalétrier allant du faîte au tirant.	6	»	42/30	21/19	»	22/10	10/19	15/15	10/15	10/16	15/15	10/19	»	12/23	»	9/9	8/7	18/3
	0	»	52/30	27/24	»	26/24	24/24	18/18	24/18	20/17	16/16	20/20	»	14/25	»	10/10	0/8	10/4
	12	»	63/45	33/30	»	32/30	30/30	22/22	30/22	22/19	17/17	22/22	»	16/28	»	11/11	10/9	20/5
Ferme avec entrait retroussé et jambe de force.	6	»	42/30	21/19	24/19	18/15	15/15	14/14	19/15	19/16	15/15	10/10	10/10	12/23	18/14	9/9	8/7	16/3
	9	»	52/37	27/24	29/24	22/18	18/18	16/16	24/18	20/17	16/16	20/20	20/20	14/23	20/15	10/10	0/8	18/4
	12	»	63/45	33/30	35/30	27/22	22/22	18/18	30/22	22/10	17/17	22/22	22/22	16/28	22/16	11/11	10/0	20/5
Ferme pour comble à la mansarde.	0	»	42/30	23/20	22/20	20/18	18/18	14/14	20/13	19/16	15/15	10/10	20/20	12/23	18/14	0/9	8/7	16/3
	9	»	52/37	30/27	29/27	25/23	23/23	16/16	27/18	20/17	16/16	20/20	21/21	14/25	20/15	10/10	9/8	18/4
	12	»	63/45	36/33	34/33	30/28	28/28	18/18	33/22	22/19	17/17	22/22	23/23	16/28	22/16	11/11	10/0	20/5

Avec le chêne et le sapin, qu'on emploie généralement, il ne convient pas d'augmenter les dimensions consignées au tableau précédent, et en soignant bien les assemblages et en disposant convenablement les pièces on peut les diminuer.

Pour un appentis, les dimensions des différentes pièces seraient à peu près les mêmes que pour une ferme complète d'une portée double. La figure 10, planche III, indique une disposition à adopter.

Dans les dispositions de fermes dont il vient d'être question, on est obligé d'avoir recours à un tirant pour contrebuter la poussée des arbalétriers sur les murs, poussée qui est d'autant plus grande que le toit est plus surbaissé et que sa portée est plus grande. Comme il y a des circonstances où l'entrait qui traverse l'édifice dans toute sa largeur serait embarrassant, on fait alors quelquefois usage du système de charpente publié par Philibert Delorme en 1561. Dans ce système, il n'y a pas de ferme proprement dite, ou plutôt chaque chevron est une espèce de ferme circulaire formée par deux cours de bouts de planches placés de champ l'un à côté de l'autre, de manière que les joints de chaque cours correspondent au milieu des bouts qui composent l'autre cours. Des liernes en bois qui traversent les fermes au milieu de leur largeur servent, par le moyen d'une clavette en bois placée sur chaque face de la ferme et traversant les liernes, à relier toutes les fermes entre elles. Ces clavettes ont aussi l'avantage de joindre entre eux les deux cours de bouts de planches qui forment chaque ferme, ce que l'on fait encore par des chevilles en bois de chêne de 0m,01 à 0m,02 de diamètre, ou, ce qui est plus facile, par des clous d'épingles. On a soin de placer une lierne à l'extrémité de chaque bout de planche, et de manière que moitié de sa hauteur se trouve entaillée dans un bout, et l'autre moitié dans le bout en contact, afin de joindre les deux bouts d'un même cours comme par un tenon. Les bouts de planches ont de 1m,30 à 1m,40 de longueur, et d'après Philibert Delorme leur section transversale doit être de

m.		m.		m.
0,216	sur	0,027	pour une portée de	8,00
0,27		0,04	*id.*	11,50
0,35		0,054	*id.*	19,50
0,35		0,067	*id.*	29,00

L'écartement des fermes est de 0m,65 environ d'axe en axe.

Le côté intérieur des planches reste droit, mais celui extérieur s'arrondit légèrement afin que l'ensemble fasse un arc continu.

Pour établir ces combles, on forme au-dessus et à l'intérieur des murs une retraite dans laquelle on établit une sablière en bois de 0m,22 à 0m,25 d'épaisseur sur une largeur égale à celle des planches. On tient la surface supérieure de cette sablière un peu au-dessous du haut de la corniche, et on y pratique des mortaises pour recevoir des tenons faits

dans les bouts des fermes. Des coyaux en planches raccordent les fermes avec la saillie de la corniche. Une fois les fermes posées, on place dessus des planches que l'on y fixe et que l'on relie entre elles. Ces planches peuvent, au besoin, dispenser d'employer les liernes dont il a été question ; mais alors on doit réunir les cours de bouts de planches de chaque ferme avec des pointes ou des chevilles de $0^m,02$; les chevilles présentant une plus grande surface que les pointes, elles se prêtent moins au glissement des deux cours l'un sur l'autre.

Plusieurs constructeurs et ingénieurs sont arrivés depuis quelques années à supprimer le tirant au moyen de fermes curvilignes de toutes portées, composées de planches ou de madriers équarris disposés de différentes manières (567).

567. *Calcul des dimensions des différentes pièces d'une ferme.* En étudiant avec attention de quelle manière les efforts se transmettent sur les différentes pièces d'une charpente, on peut calculer très-approximativement les dimensions qu'il convient de leur donner. Pour prendre une idée de ce genre de calcul, considérons :

1° Une ferme composée seulement de deux arbalétriers et d'un entrait, figure 11, planche III. Soit :

N la réaction horizontale de chacun des arbalétriers sur l'extrémité de l'autre ;
P le poids de chaque arbalétrier et de sa charge ; P est réparti uniformément sur toute la longueur de l'arbalétrier ;
l la demi-portée de la ferme ;
m la hauteur de la ferme ;
$L=\sqrt{l^2+m^2}$ la longueur de l'arbalétrier ;
a l'angle que font les arbalétriers avec l'entrait.

Il faut d'abord, pour que le système se maintienne en équilibre, que, pour chaque arbalétrier, les forces P et N, qui tendent à les faire tourner autour des points A ou C, se fassent équilibre autour de ces points, et que l'on ait par conséquent (*Int.* 1040 et suiv.)

$$N \times m = P \times \frac{l}{2}, \quad \text{d'où} \quad N = P\,\frac{l}{2m}.$$

L'arbalétrier AB est sollicité par compression, dans le sens de la longueur de ses fibres, par la résultante Q des deux forces N et $\frac{P}{2}$ appliquées au point B. On a (*Int.* 1008)

$$Q : \frac{P}{2} :: L : m, \quad \text{d'où} \quad Q = P\,\frac{L}{2m}.$$

Ayant Q, à l'aide de ce qui a été dit n° 213, on déterminera les dimensions à donner à l'arbalétrier AB pour résister à cette force.

L'arbalétrier AB doit aussi résister à la composante $P\cos a = P\,\frac{l}{L}$

du poids P, normale à l'arbalétrier et répartie uniformément sur toute sa longueur.

On aura donc, d'après ce qui a été dit n° 220,

$$P\frac{l}{L}\times\frac{L}{8}=\frac{Rbh^2}{6},\quad \text{d'où}\quad bh^2=\frac{3Pl}{4R}.$$

b, h et R ont les mêmes significations qu'au n° 215.

Nous avons vu (215) qu'il convenait de faire varier R entre 550 000 et 750 000. Faisant R = 700 000, cette valeur substituée dans l'équation précédente donne

$$bh^2=0{,}000\,001\,07\ Pl.$$

M. Ardant pose (*Mémoire sur les combles*)

$$bh^2=P(0{,}000\,001\,11\ h+0{,}000\,001\,07\ l).$$

Formule qui ne diffère de la précédente que par le terme en h, que M. Ardant introduit pour tenir compte de la compression due à la force qui agit dans le sens des fibres, et que l'on peut négliger près de celui en l.

La valeur précédente de R convient pour les charpentes ordinaires; mais pour des bois secs et bien équarris à vives arêtes on peut faire R = 800 000, et même R = 1 000 000 si le bois est de choix.

L'entrait doit résister par traction à l'effort $T=N=P\frac{l}{2m}$ qui lui est transmis par les arbalétriers dans le sens de sa longueur; on doit donc avoir

$$P\frac{l}{2m}=bh\times 600\,000,\quad \text{d'où}\quad bh=0{,}000\,000\,833\ P\frac{l}{m}.$$

600 000 nombre de kilogrammes que peut supporter le chêne par mètre carré de section (211).

L'entrait tend à se rompre par flexion sous son propre poids; on doit donc avoir, pour qu'il résiste à cet effort, en appelant δ le poids du mètre cube de bois, et en remarquant que le poids est réparti uniformément sur toute la longueur (220).

$$\frac{\delta bh\times 4l^2}{8}=\frac{Rbh^2}{6},\quad \text{d'où}\quad bh=\frac{3\delta bl^2}{R}.$$

Faisant R = 700 000, on a

$$bh=0{,}000\,004\,29\delta bl^2.$$

Ajoutant cette valeur à la précédente, afin que l'on soit sûr que la section de l'entrait sera suffisante pour résister simultanément aux efforts de traction et de flexion, on aura en définitive

$$bh = 0{,}000\,000\,833\ \mathrm{P}\ \frac{l}{m} + 0{,}000\,004\,29^{3}bl^{2}.$$

Quand le tirant est en fer, il doit en outre résister au retrait résultant de la diminution de température. Or le fer se contractant de 0,0000122 de sa longueur par degré centigrade de refroidissement (253), comme il faut 12 205 000 kilog. pour allonger une pièce de fer de 1 mètre carré de section des 0,00066 de sa longueur primitive (211), il en résulte que, pour chaque degré centigrade de diminution de température, un tirant dont la section est A produira sur chacune de ses extrémités, en tendant à se raccourcir, une traction égale à

$$\mathrm{A}\ \frac{0{,}0000122}{0{,}00066} \times 12\,205\,000 = \mathrm{A} \times 225\,608 \text{ kilog.}$$

et si la température passe de t à t', la traction du tirant sera

$$\mathrm{A} \times 225\,608\,(t - t').$$

Supposant que le fer employé résiste à un effort permanent de 10 000 000 kilog. par mètre carré de section (211), on devra donc avoir pour que le tirant résiste à la poussée $\mathrm{N} = \mathrm{P}\ \frac{l}{2m}$ des arbalétriers et à l'effet de la contraction,

$$10\,000\,000 \times \mathrm{A} = \mathrm{P}\ \frac{l}{2m} + \mathrm{A} \times 225\,608\ (t - t');$$

d'où l'on tire

$$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{P}\ \frac{l}{2m}}{10\,000\,000 - 225\,608\,(t-t')}.$$

2° Pour une ferme à tirant et faux entrait, telle que l'indique la fig. 12, pl. III, on calculera les dimensions à donner à la partie supérieure AB de l'arbalétrier de la même manière que dans le cas précédent, c'est-à-dire comme si la partie ABC reposait sur des murs en B et C. Quant à la partie inférieure BD, on la calculera pour résister par flexion à la composante, normale à sa direction, de la charge comprise entre B et D (1°), et pour résister par compression suivant ses fibres, à une force que l'on déterminera de cette manière : la moitié du poids de la partie supérieure ABC est portée par le point B; de plus, le poids de la portion BD se décompose en deux parties égales, l'une appliquée au point D et qui repose directement sur le mur, l'autre appliquée au point B et qui s'ajoute à la moitié du poids de la partie supérieure ABC pour produire une charge verticale p. Le point B est sollicité non-seulement par p, mais aussi par la réaction du faux entrait, et comme il y a équilibre,

ces deux forces donnent une résultante BF dirigée suivant BD, et à laquelle cette pièce devra résister par compression. De la proportion

$$BF : Bp = p :: L : m, \quad \text{on conclut} \quad BF = p\,\frac{L}{m}.$$

Ayant la composante BF, on calculera les dimensions de BD d'après ce qui a été dit n° 213.

Le faux entrait ne résiste que quand AD fléchit; mais il convient de le calculer pour résister par compression à la composante BG. Remarquant que l'on a $BG = pF$, il en résulte que l'on peut poser

$$BG : Bp = p :: l : m, \quad \text{d'où} \quad BG = p\,\frac{l}{m}.$$

Ayant BG, on calculera les dimensions du faux entrait CB, d'après ce qui a été dit n° 213.

Quant au tirant, le faux entrait agissant par compression, on doit le calculer comme si cette pièce n'existait pas (1°).

3° *Pour un comble retroussé*, fig. 13, pl. III, il est évident que si l'arbalétrier doit se briser, ce sera au point B; c'est donc pour ce point qu'il faut calculer les dimensions à lui donner. Or remarquons que la réaction verticale DP du mur, sous l'extrémité de l'arbalétrier, est égale au poids total P du pan AD, et que P se décompose en deux forces, l'une DF dirigée suivant DB pour comprimer cette pièce dans le sens de la longueur de ses fibres, et l'autre DE perpendiculaire à BD, qui agit avec un bras de levier $BD = L'$ pour rompre cette pièce en B; les triangles semblables DEP et ADK donnent

$$DE : DP = P :: l : L, \quad \text{d'où} \quad DE = P\,\frac{l}{L}.$$

On calculera alors les dimensions à donner à l'arbalétrier au point B, à l'aide de la formule

$$P\,\frac{lL'}{L} = \frac{Rbh^2}{6}, \quad \text{d'où} \quad bh^2 = \frac{6PlL'}{RL}. \qquad (215)$$

Faisant $R = 600000$, cette formule devient

$$bh^2 = 0{,}00001\,\frac{PlL'}{L}.$$

La force verticale P, appliquée au point D, tend à faire tourner l'arbalétrier autour du point A avec le bras de levier l; la traction T de l'entrait CB s'oppose à ce mouvement avec un bras de levier m', et comme la charge P s'oppose aussi à ce mouvement avec le bras de levier $\frac{l}{2}$, puisqu'il y a équilibre entre ces trois forces, on a

$$Pl = Tm' + \frac{Pl}{2}, \quad \text{d'où} \quad T = \frac{Pl}{2m'}.$$

Ayant T, on déterminera les dimensions à donner à CB, d'après ce qui a été dit ci-dessus (1°) (211).

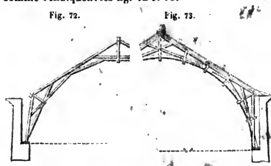
4° *Pour des combles retroussés supportés par des poteaux réunis aux arbalétriers par des aisseliers*, fig. 14, pl. III, M. Ardant donne les formules suivantes pour calculer les dimensions des arbalétriers et des poteaux.

INCLINAISON DU TOIT.	ARBALÉTRIERS.	POTEAUX.
2 de base pour 1 de haut.	$bh^2 = 0.00000104Pl$	$bh^2 = 0.00000226Pl$
3 — 2	$bh^2 = 0.00000104Pl$	$bh^2 = 0.00000202Pl$
1 — 1	$bh^2 = 0.00000105Pl$	$bh^2 = 0.00000163Pl$

Ces formules, dans lesquelles P est le poids d'un des pans du toit en l la demi-ouverture, ont été données pour des fermes formant des polygones circonscrits à des cercles.

Pour les constructions exécutées avec beaucoup de soin et avec des bois de choix, d'après M. Ardant, au lieu de faire travailler les charpentes au 1/10 de la charge qui produirait la rupture, ce que supposent les formules, on peut les charger jusqu'au 1/6 environ; ce qui revient à multiplier par 6/10 les coefficients numériques de ces formules (page 735).

5° Pour de plus grandes portées, les fermes précédentes se composent comme l'indiquent les fig. 72 et 73.


Fig. 72. Fig. 73.

Pour ces dispositions, on fait encore usage des formules du tableau précédent, mais en partageant l'épaisseur trouvée pour l'arbalétrier entre cette pièce et le renfort qui la double, et celle trouvée pour le poteau entre l'ensemble formé par cette pièce et la jambe de force, en donnant à celle-ci la largeur du poteau.

Application de ces règles, faite par M. Ardant, aux fermes du manége de Pont-à-Mousson. On a

$2l = 18$ mètres;
Inclinaison du toit, 27° à l'horizon ou 63° avec la verticale;
Longueur de l'arbalétrier, 10^m,75;
Écartement des fermes, 3^m,50.

Poids de la couverture par mètre carré :

1° 50 tuiles courbes de Lorraine, mouillées.	90 kilog.
2° Un mètre carré de plancher de $0^m,027$ d'épaisseur, avec clous. .	19
3° Deux mètres courants de chevrons de $0^m,10$ sur $0^m,10$.	14
	123
Poids porté par une demi-ferme, $10,75 \times 3,50 \times 123 =$.	4628
Cube approximatif d'une demi-ferme, $2^m,50$; poids, $2,50 \times 600 =$. .	1500
Poids des pannes et liernes, évalué à.	600
Total.	6728 kilog.

Soit $$P = 7000 \text{ kilog.}$$

L'équarrissage de l'arbalétrier est alors donné par la formule

$$bh^2 = 0,00000104 \times 7000 \times 9 = 0,06552.$$

On a fait $b = 0^m,20$, et l'on tire $h = 0^m,572$.

On a adopté $h = 0^m,58$.

Pour le poteau, on a

$$bh^2 = 0,00000226 \times 7000 \times 9 = 0,14238.$$

On a fait $b = 0^m,40$, partagé entre les deux moises qui forment le poteau, et l'on a déduit

$$h = 0^m,596, \quad \text{soit} \quad h = 0^m,60.$$

On a partagé cette épaisseur entre le poteau et la jambe de force, en donnant à chacune de ces pièces $0^m,20$ de largeur sur $0^m,30$ d'épaisseur.

En opérant ainsi, M. Morin a calculé les résultats du tableau suivant, pour des arbalétriers inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur et chargés de 400 kilog. par mètre courant de projection horizontale.

PORTÉE de la ferme.	ÉQUARRISSAGE			
	de l'arbalétrier.	des sous-arbalétriers et aisseliers.	de chacune des moises des poteaux.	de la jambe de force.
m.	m. m.	m. m.	m. m	m. m.
24	0.20 et 0.25	0.20 et 0.20	0.125 et 0.25	0.20 et 0.25
22	0.20 et 0.22	0.20 et 0 20	0.125 et 0.22	0.20 et 0.25
20	0.20 et 0.20	0.20 et 0.20	0.125 et 0.20	0.20 et 0.25
18	0.15 et 0.20	0,15 et 0.20	0.125 et 0.18	0.15 et 0.15
16	0.15 et 0.18	0.15 et 0 15	0.120 et 0.16	0.15 et 0.15
14	0.15 et 0.15	0.15 et 0.15	0.120 et 0.15	0.15 et 0.15

6° Les fermes du système de M. Émy sont composées d'une ferme de pièces droites, comme les précédentes, reliée par des moises pendantes à une ferme intérieure en arc de cercle formée de madriers posés à plat l'un sur l'autre. Des expériences de M. Ardant sur ce genre de fermes, il résulte que la ferme droite porte à peu près les 2/3 du poids du toit, et que l'arc porte l'autre tiers. Il conviendra donc de calculer les dimensions de la ferme droite à l'aide des formules précédentes (4°), dans lesquelles on fera P égal aux 2/3 du poids du pan de toit qui repose sur la ferme.

Quant aux dimensions de l'arc, on se servira des formules suivantes, dues à M. Ardant, et qui sont aussi applicables à des arcs simples, c'est-à-dire non accompagnés de fermes droites.

MODE de répartition de la charge.	POUSSÉE au niveau des naissances.	ABAISSEMENT du sommet ou du point de suspension de la charge.	ÉQUARRISSAGE, EN MÈTRES, DES ARCS	
			dont la section est rectangulaire.	dont la section est circulaire.
Uniformément sur la circonférence. . . .	0.16P	$0.051\ \frac{Pl^3}{Ebh^3}$	$bh^2=\frac{P}{R}(0.599h+0.27l)$	$r^3=\frac{P}{R}(0.124r+0.062l)$
Uniformément par rapport à l'horizontale. .	0.22P	$0.084\ \frac{Pl^3}{Ebh^3}$	$bh^2=\frac{P}{R}(0.680h+0.25l)$	$r^3=\frac{P}{R}(0.200r+0.044l)$
Suspendue au sommet.	0.32P	$0.222\ \frac{Pl^3}{Ebh^3}$	$bh^2=\frac{P}{R}(0.597h+0.55l)$	$r^3=\frac{P}{R}(0.200r+0.212l)$
Suspendue au-dessus du milieu du rayon.	0.28P	$0.173\ \frac{Pl^3}{Ebh^3}$		

P poids porté par l'arc entier; c'est alors le 1/3 du poids total du toit supporté par la ferme du système de M. Émy;

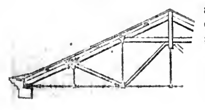
l rayon moyen de l'arc;

r rayon de la section transversale de l'arc;

R coefficient qu'il convient de faire égal à 300 000, pour les arcs en pièces de bois (215);

E coefficient qu'il convient de faire égal à 500 000 000 pour le bois (215).

Les formules précédentes sont encore applicables aux arcs en fer fondu ou forgé; mais alors R = 5000000 et E = 1200000000.


Fig. 74.

7° Pour les grandes fermes antiques ou à la Palladio, en charpente, avec tirant et aiguilles pendantes en fer également espacées, fig. 74, les dimensions des différentes pièces se calculent à l'aide des formules suivantes :

Arbalétrier supérieur $bh^2 = P'\,(0.00\,000\,111\,h + 0.00\,000\,107\,l')$;
Arbalétrier inférieur $bh^2 = P''\,(0.00\,000\,257\,h + 0.00\,000\,107\,l'')$;

Entrait en bois $bh = 0.0\,000\,009\,P''\,\frac{l}{f} + 0.00\,000\,107\,dbl'^2_1$;

Tirant en bois ne portant pas plancher $bh = 0.0\,000\,009\,P\,\frac{l}{f} + 0.00\,000\,011\,dbl_1^2$;

Tirant en fer ne portant pas plancher $bh = 0.0\,000\,001\,P\,\frac{l}{f} + 0.00\,000\,011\,dbl_1^2$;

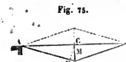
P charge totale de l'arbalétrier, qui est composé de deux, l'un allant du faîte à l'entrait en bois, et l'autre allant de cet entrait au tirant;
P' et P'' charges respectives des arbalétriers supérieur et inférieur;
b dimension horizontale de la section des pièces, et h dimension perpendiculaire à b;
$2l$ portée totale de la charpente;
f montée ou hauteur du faîte au-dessus du tirant;
l' et l'' longueurs respectives des projections horizontales des deux parties de l'arbalétrier, $l' + l'' = l$;
d densité de la matière dont le tirant est composé;
l_1 longueur de tirant comprise entre deux aiguilles consécutives;
l'_1 longueur d'entrait comprise entre le poinçon et l'arbalétrier.

Nous avons vu dans les examens précédents que les poinçons et les tirants agissent par traction. Il convient donc, afin de diminuer la dépense et le poids du toit, de les construire en fer; c'est ce que l'on fait souvent.

Les arbalétriers et les faux entraits agissant par flexion et par compression; on les fait le plus généralement en bois.

568. *Charpentes en fer.* Ce système de charpentes tendant à se répandre de jour en jour, quoique la détermination des efforts que les différentes pièces qui les composent soit très-simple, puisqu'elle revient à la décomposition ou à la composition des efforts extérieurs, ce qui peut se faire, soit géométriquement, soit par le calcul, nous allons cependant exposer la marche à suivre dans les cas qui peuvent se présenter. Il est évident que, suivant les localités, on pourra faire usage simultanément du fer, du bois et de la fonte.

Fig. 75.



1° *Pièce* AB *reposant sur deux appuis, soutenue en son milieu par un poinçon* CD *reposant sur un tirant* ADB, *et chargée d'un poids* P *uniformément réparti sur toute sa longueur, ce qui revient à une charge* $\frac{P}{2}$ *appliquée au milieu* C (fig. 75). Soient :

L la distance AB des points d'appui;
M la longueur CD du poinçon;
N la longueur de chacun des tirants AD et DB; $N = \sqrt{\frac{L^2}{4} + M^2}$;
Q l'effort de compression suivant la longueur de CD;
T la tension de chacun des tirants;

Si on suppose que le point C ne s'abaisse pas sous la charge, on a

$$Q = \frac{P}{2}. \qquad (217)$$

Le point D étant en équilibre sous l'action des tensions T des tirants AD et DB et de la charge Q du tirant, on a

$$T : Q :: N : 2M, \quad \text{d'où} \quad T = Q\,\frac{N}{2M} = P\,\frac{N}{4M}. \qquad (218)$$

Chacune des parties AC et BC résiste par compression à la résultante Q′ de la portion de charge $\frac{P}{4}$ de l'appui A et de la tension T, et on a

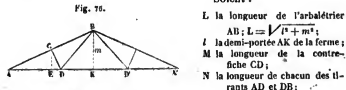
$$Q' = \frac{PL}{8M}. \qquad (219)$$

Dans la pratique on ne doit pas supposer que le point C ne s'abaisse pas; car avant de mettre la charge, ou en l'enlevant, la réaction des tirants ferait fléchir la pièce de bas en haut avec un effort Q appliqué au milieu C. Pour diminuer autant que possible la flexion absolue, on fait fléchir la pièce de haut en bas de manière à lui faire supporter directement la moitié $\frac{P}{4}$ de la charge appliqué au point C, et on a alors

$$Q = \frac{P}{4} \qquad T = Q\,\frac{N}{2M} = P\,\frac{N}{8M} \quad \text{et} \quad \frac{PL}{16} = \frac{RI}{n}. \qquad (220)$$

2° *Charpentes à grande portée avec tirants et contre-fiches* (fig. 76).

Fig. 76.



Soient :

L la longueur de l'arbalétrier AB; $L = \sqrt{l^2 + m^2}$;
l la demi-portée AK de la ferme;
M la longueur de la contre-fiche CD;
N la longueur de chacun des tirants AD et DB;
m la montée BK du toit;
α l'angle des arbalétriers avec l'horizon;
Q l'effort de compression de CD;
T, T′ et T″ les tensions respectives des tirants DD′, AD et DB;
P la charge totale de chaque arbalétrier, répartie uniformément sur toute leur longueur.

Ce cas est celui du 1° du n° 567, dans lequel les arbalétriers sont remplacés par les systèmes rigides ADB, A′D′B. Ainsi on a d'abord

$$T = P\,\frac{l}{2m}.$$

Puis, par analogie avec le 1°, le système ADB donne

$$Q = \frac{P}{4}\cos\alpha = \frac{P}{4} \times \frac{l}{L} \qquad T'' = Q\,\frac{N}{2M} \qquad T' = T + T''$$

$$P\,\frac{lL}{16L} \text{ ou } \frac{Pl}{16} = \frac{RI}{n}.$$

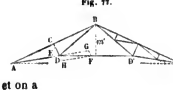


Fig. 77.

3° *Cas où le tirant est à un niveau supérieur à celui des points d'appui*, fig. 77. Quant à la tension T, on se trouve dans les conditions de l'entrait retroussé (3°, n° 567), et on a

$$T = P\,\frac{l}{2m'}.$$

Comme au 2°

$$Q = \frac{P}{4} \times \frac{l}{L}.$$

Décomposant T, représenté à une certaine échelle par DF, en deux forces, l'une $DG = T_1$ dirigée suivant AD, et l'autre $DH = T_2$ dirigée suivant CD, le point D étant en équilibre sous l'action des 3 forces $Q + T_2$, $T' - T_1$ et T'', on a

$$T'' = (Q + T_2)\,\frac{N}{2M} \quad \text{et} \quad T' = T_1 + T''.$$

On a encore, comme au 2°, pour calculer la section de l'arbalétrier,

$$\frac{Pl}{16} = \frac{RI}{n}.$$

Cette section devra être suffisante pour que AC puisse résister par compression.

Si l'on avait un plus grand nombre de contre-fiches, comme dans la partie droite de la fig. 77, on suivrait la même marche pour calculer les tensions des tirants successifs, la pression des contre-fiches et les efforts auxquels sont soumis les entraits.

Comme les assemblages ajoutent à la solidité, et que l'on ne fait usage pour les grandes charpentes que de matériaux de choix, après avoir tenu compte de tous les efforts, on pourra faire R égal à 8000000 pour le fer et à 1 000000 pour le bois.

569. *Poids et inclinaison des toits.* Il ne nous reste, pour pouvoir calculer les dimensions des différentes pièces d'une ferme, qu'à évaluer le poids P (567 et 568), qui se compose du poids de la couverture, de celui du bois qui entre dans la charpente, de celui de la neige qui peut se déposer sur le toit, et de la pression du vent.

M. Ardant *donne les résultats suivants pour les couvertures les plus usitées.*

NATURE DE LA COUVERTURE.	INCLINAISON du toit sur l'horizon.	POIDS du mètre carré de couverture (bois non compris)	CUBE DE BOIS par mètre carré.
		k.	m.c.
Tuiles plates à crochet. . .	45° à 33°	60	0.063
Tuiles creuses, posées à sec.	27 à 21	75 à 90	0.058
id. maçonnées. .	31 à 27	136	0.068
Ardoises	45 à 33	38	0.056
Cuivre en feuilles.	21 à 18	14	0.042
Zinc, n° 14.	21 à 18	8.50	0.042
Mastic bitumineux.	21 à 18	25	0.056

La neige pesant dix fois moins que l'eau, pour la couche maximum de $0^m,50$ qui peut s'amonceler sur un toit, il faudrait compter sur un poids de 50 kilogrammes par mètre carré de couverture. Dans nos climats on compte ordinairement sur 25 kilogrammes.

Quant à l'influence du vent, on s'en rendra compte à l'aide de ce qui a été dit n° 205, soit que l'on suppose que des rafales amènent le vent normalement aux pans du toit, soit que l'on suppose que le vent se meuve horizontalement et frappe le toit sous un certain angle. En France on néglige le plus souvent l'influence du vent, dont la vitesse n'est en moyenne que de 6 à 7 mètres.

570. *Couvertures des édifices.* Dans les pays où il pleut rarement et ne neige jamais, les toits sont peu inclinés. En Égypte et en Syrie toutes les maisons sont couvertes en terrasse, dans le midi de la France les toits ont une faible pente, dans nos climats la pente la plus ordinaire est de 1/3 de la largeur de l'édifice. Du reste, les matériaux employés à la couverture ont une grande influence sur cette pente. Ces matériaux sont la tuile, l'ardoise, le bardeau, le cuivre, le zinc, le plomb, le fer, la fonte de fer.

571. *Tuiles.* On a fabriqué des tuiles de plusieurs formes. A Paris on fait un usage fréquent de tuiles plates dites de Bourgogne, dont les dimensions sont variables; celles du grand moule ont $0^m,31$ sur $0^m,23$ et $0^m,0157$ d'épaisseur, il en faut 42 par mètre carré de surface de toiture; celles du petit moule ont $0^m,257$ de longueur sur $0^m,183$ de largeur et $0^m,014$ d'épaisseur, il en faut 64 par mètre carré de toiture.

On pose les tuiles sur des lattes de $1^m,30$ de longueur et de $0^m,0067$ d'épaisseur, espacées tant plein que vide si elles ont $0^m,05$ à $0^m,06$ de largeur. Ces dimensions sont le plus souvent aujourd'hui réduites à $0^m,0034$ d'épaisseur sur $0^m,041$ à $0^m,045$ de largeur, ce qui ne diminue

pas peu la solidité de la toiture. On fixe les lattes avec des clous de 0m,027 de longueur, et de 620 à 640 au kilogramme.

Les tuiles se posent par rangs horizontaux en commençant par le bas du toit. Les tuiles d'un rang couvrent aux deux tiers celles du rang inférieur; la partie qui reste découverte prend le nom de *pureau*. Le rang inférieur se pose sur mortier, et il fait saillie de 0m,10 sur la corniche; sur ce premier rang on en pose un second à joints croisés, qu'on nomme *doublis*. Quand il y a une corniche avec chaîneau, on pose ordinairement un rang simple de tuiles s'appuyant sur le chaîneau. Quand il n'y a pas de corniche, on la remplace par une chanlate sur laquelle on pose les tuiles comme sur la corniche (565).

Les tuiles creuses employées dans le midi de la France ont 0m,40 de longueur et 0m,015 d'épaisseur; elles ont 0m,20 de diamètre à un bout et 0m,15 à l'autre, ce qui les rend coniques.

La pente des combles couverts de ces tuiles ne doit pas excéder 26°, et elle est ordinairement de 18° à 21°. Les rangs verticaux de tuiles présentant leur concavité sont espacés de 0m,04, et les tuiles se recouvrent en longueur de 0m,05 à 0m,06. Les intervalles compris entre ces premiers rangs se recouvrent par d'autres rangs présentant leur convexité.

Il y a les tuiles flamandes, dites *tuiles pannes;* la fig. 15, planche III, représente leur coupe transversale et la manière dont elles s'agrafent latéralement; elles se posent sur de grosses lattes bien dressées. Ces tuiles ont environ 0m,35 de côté sur 0m,016 d'épaisseur; il en faut 15 1/4 par mètre carré de toit.

Les tuiles romaines, qui s'agrafent mutuellement sur deux arêtes, et se posent de manière qu'une de leurs diagonales soit horizontale et l'autre dirigée suivant la pente du toit, ont été ressuscitées il y a quelques années par M. Gourlier; elles pèsent 45 kilog. le mètre carré.

Plusieurs personnes se sont occupées de la fabrication des tuiles plates, et en ont donné des modèles de différentes formes et grandeurs, dont un des plus remarquables est celui que M. Jolibois exploite depuis plusieurs années dans la Lorraine, à Deyvillers, près d'Épinal, à Lerrain, près de Mirecourt, et à Corny, près de Metz.

La pose des tuiles Jolibois est facile et n'exige pas des ouvriers très-expérimentés. Les faibles surfaces de contact n'entretiennent pas l'humidité, et par suite évitent cette végétation mousseuse qui entraîne promptement la ruine des couvertures. La capillarité et le vent ne peuvent faire franchir à l'eau et à la neige les fortes saillies qui entourent les tuiles. La couverture est d'un aspect agréable qui s'harmonise très-bien avec les grands monuments.

On ne se douterait pas que le bâtiment de Deyvillers, qui provient d'une ancienne papeterie, ait jamais eu d'autre destination que celle à laquelle il est utilisé, tant les machines et appareils y sont disposés avec art, et le service se fait avec régularité et ensemble.

Tout le travail de la terre se fait dans un étage souterrain, au milieu duquel se trouvent les fours, dont le massif s'élève au niveau du rez-de-chaussée.

On fait détremper la terre pendant 24 heures dans une cave qui longe extérieurement le bâtiment de la fabrique; puis on la fait passer entre des cylindres en fonte espacés de 5 millimètres, afin qu'aucune particule de terre n'échappe au complet ramollissement. Un ouvrier la reçoit alors et la met en boules que l'on fait passer deux et jusqu'à trois fois entre de nouveaux cylindres espacés seulement de 1 millimètre, qui la réduisent en pâte fine et homogène. A cet état, on la tasse, en la triturant avec les pieds, dans une caisse rectangulaire en bois. La caisse étant remplie, en l'ouvrant, la terre bien piétinée en conserve la forme, et des fils de fer placés sur le fond mobile de la caisse la divisent en quatre ou six parties, que deux ouvriers refendent en plaques, à l'aide d'un fil de fer dont ils tiennent les extrémités. Les plaques se placent sur des moules en fonte, et un coup de presse à vis leur donne la forme des tuiles. On les pose sur des planchettes en bois et on les porte aux étendoirs, où on les laisse prendre assez de consistance pour qu'on puisse les manier sans les déformer. A cet état, on enlève les bavures qu'ont laissées les presses; puis on les porte de nouveau aux étendoirs, mais en les plaçant dans une position verticale et au-dessus des fours, où la température plus élevée termine la dessiccation.

Les étendoirs sont au premier étage et dans un grenier formant un deuxième étage.

M. Jolibois cuit ses tuiles dans douze fours très-simples, dont on va comprendre facilement la disposition. Un massif de $2^m,60$ environ de largeur en maçonnerie de briques, ayant pour coupe horizontale un rectangle terminé par deux demi-cercles, occupe le milieu de tout le système. Ce massif est entouré complétement par une voûte continue en plein cintre de $1^m,70$ de portée, ayant pour pieds-droits d'un côté tout le pourtour du noyau, et de l'autre un mur de $1^m,50$ d'épaisseur. Cette voûte annulaire est divisée en douze compartiments par des murs transversaux de $0^m,70$ d'épaisseur espacés entre eux de $3^m,40$ dans œuvre, et chacun de ces compartiments forme un four. Il y a six fours placés le long des parties droites du massif central et trois autour de chacune des parties arrondies.

Chaque four a ainsi $3^m,40$ de longueur totale et $1^m,70$ de largeur; sa hauteur sous clef est de $2^m,55$.

Les murs séparatifs sont percés chacun de quinze trous de $0^m,15$ de côté, convenablement placés à trois étages différents et servant à faire passer les gaz d'un four dans un autre. Des registres en fonte, se mouvant horizontalement, sont manœuvrés par des tiges qui traversent les murs extérieurs des fours et servent à régler ce passage. Deux petits

regards faits dans les murs extérieurs, près des murs séparatifs, guident dans la manœuvre des registres.

Sur le haut de chaque mur séparatif débouche un canal qui communique avec un conduit qui règne sur tout le massif et va joindre la cheminée commune, qui est placée au milieu de ce massif. Ces canaux sont garnis de registres, afin qu'en les fermant et en ouvrant les trous des murs séparatifs on puisse faire passer la flamme d'un même foyer dans deux, trois ou même quatre fours.

La cheminée est divisée en deux compartiments, dont l'un sert pour les fours en feu, et l'autre à laisser se dégager le calorique des fours cuits, quand le service de l'établissement ne le réclame pas.

Chaque four est divisé en deux parties, l'une formant la chambre de chauffe, ou foyer, et l'autre recevant la marchandise à cuire.

La chambre de chauffe a 0m,50 de longueur; elle règne sur toute la largeur du four et en occupe toute la hauteur. On y arrive par une porte de 0m,50 de largeur et 1m,30 de hauteur faite dans le mur extérieur. Cette porte est murée en briques pendant la cuisson, sauf une ouverture de 0m,30 à 0m,40 de côté, fermée par une dalle, et servant à faire un petit feu dans le premier four mis en feu et au besoin à retirer les cendres ou les braises pendant la cuisson normale. La voûte est percée de deux ouvertures de 0m,25 de côté, au-dessus de chaque chambre de chauffe; c'est par ces ouvertures que l'on introduit le bois, qui brûle dans une position verticale, et par suite mieux en regard de toute la masse à cuire et en contact avec le courant d'air. Le foyer est séparé de la marchandise par une murette en briques réfractaires, à joints de 0m,02, afin de laisser passer librement la flamme tout en préservant les tuiles du premier choc du foyer.

Le reste du four est rempli complétement. On ménage des carneaux de 0m,10 de largeur sur 0m,30 de hauteur à la partie inférieure du four. Ces carneaux sont faits en briques, et recouverts avec des dalles ayant 0m,35 de longueur et espacés de 0m,05. La marchandise est introduite dans le four par une ouverture de 0m,40 de côté, pratiquée dans la voûte, du côté opposé au foyer.

Deux regards placés au sommet de la voûte permettent de juger si toutes les parties du four sont également atteintes par le calorique.

Dans le cas où on brûlerait de la houille ou de la tourbe, on établirait une grille et un cendrier au bas de la chambre de chauffe.

La durée du feu est de 24 heures pour le premier four mis en feu, dont 14 de petit feu et 10 de grand. Tous les autres fours qui ont profité de la chaleur perdue dans les fours précédents sont cuits en 12, 10 et 8 heures de feu, selon la qualité du bois et le soin qu'a mis le chauffeur à bien utiliser la chaleur perdue. La cuisson parfaite d'un four n'exige que 4 stères de bois ou 80 fagots, et on a encore assez de chaleur pour sécher la marchandise.

Une roue hydraulique fait marcher les cylindres et élève les tuiles dans les étendoirs. Les deux presses sont encore mues à bras d'homme.

Les deux presses marchant bien peuvent donner 4000 tuiles par jour; mais comme on fait défourner par les ouvriers d'une presse, et que ce travail prend à peu près la moitié du temps, on ne moule par semaine que 16000 tuiles, dont 1000 sont rejetées avant d'arriver au four.

Le personnel de la fabrique est de cinquante personnes, tout compris, employés, ouvriers, femmes et enfants.

M. Jolibois est breveté pour les différents détails de sa fabrication.

572. *Ardoises.* On en fait de trois modèles, qui ne diffèrent que par leurs dimensions. Le grand modèle d'Angers a 0m,298 sur 0m,217, le moyen modèle de Charleville a 0m,271 sur 0m,189, et le petit modèle (cartelettes d'Angers) 0m,217 sur 0m,162. L'épaisseur commune à toutes les ardoises est de 0m,0033; pour les cartelettes d'Angers elle n'est que de 0m,0028. Le mille pèse 612 kilog. pour le grand modèle, 485 kilog. pour le modèle moyen, et 284 kilog. pour le petit. On enlève les angles de leur partie supérieure.

Les ardoises se recouvrent des 2/3 environ de leur longueur, le *pureau* n'est que de 1/3 ; ce grand recouvrement est dû à ce que la capillarité tend toujours à faire monter l'eau entre les ardoises. La pente des toits varie entre 33° et 45°; avec une pente moindre, malgré le grand recouvrement, les voliges sur lesquelles on pose les ardoises sont sujettes à se mouiller, elles se pourrissent, les clous qui y fixent les ardoises n'y adhèrent plus, et le vent peut enlever la couverture.

Les ardoises se posent sur des planches en bois blanc, ordinairement en sapin, de 0m,011 d'épaisseur, non jointives, et disposées, autant que possible, de manière que toutes leurs faces supérieures soient dans un même plan. Il faut 46 ardoises du grand modèle, 59 du moyen ou 85 du petit pour couvrir un mètre carré de toit.

Comme pour les autres couvertures, on commence à poser les ardoises par l'égout, que l'on forme en superposant sur la chanlate deux ou trois rangs d'ardoises, afin de donner assez de solidité à cette partie inférieure pour résister au vent. Les ardoises qui forment l'égout se posent ordinairement sur plâtre, en leur laissant faire saillie de 0m,04 à 0m,05 sur la chanlate. Quand on a de bonnes tuiles, on les emploie à faire l'égout, que l'on met alors en saillie de 0m,10 environ sur la chanlate.

A partir de l'égout, les ardoises se placent par rangs horizontaux comme pour les tuiles plates (571).

Pour percer et clouer les ardoises, et tailler leurs bords, l'ouvrier se sert d'un marteau qui porte une pointe d'un côté, une tête étroite dirigée suivant la direction du manche de l'autre, et dont le manche est un tranchant en acier sur une certaine longueur; l'ouvrier se sert en outre d'une enclume qui n'est autre chose qu'une lame d'acier tran-

chante, portant vers le milieu de sa longueur une pointe en retour d'équerre. Il implante cette queue dans les voliges, à côté de lui; puis appliquant l'ardoise sur l'enclume, en laissant dépasser ce qu'il veut couper, il trace, avec la pointe de son marteau qu'il fait glisser le long de l'enclume, une ligne apparente sur l'ardoise; il retourne son ardoise, et faisant correspondre la ligne qu'il vient de tracer au tranchant de l'enclume, à l'aide du manche de son marteau qu'il applique obliquement le long de l'enclume, il frappe à petits coups sur l'ardoise pour en détacher la partie qui dépasse la ligne tracée. Pour percer l'ardoise, il applique le point voisin du trou sur l'enclume, et d'un petit coup frappé avec la pointe de son marteau, il fait le trou. La tête du marteau lui sert à clouer les voliges et les ardoises. Les clous employés pour fixer les ardoises sont de 570 au kilogramme.

Dans les noues et sur les arêtiers, on fait usage de feuilles de métal, qui pénètrent sous les ardoises voisines dans le premier cas, et qui sont placées dessus dans le second.

Quand on calcule le prix d'une couverture, il faut évaluer sa surface exacte, et ajouter 1/5 environ en sus pour les sujétions d'égouts, de faîtes, etc.; cette addition est d'environ 1f,20 par mètre carré de surface du toit.

573. *Les bardeaux* sont des tuiles en bois de chêne, et quelquefois de sapin; ils ont 0m,406 de longueur, 0m,135 de largeur et 0m,011 d'épaisseur; il en faut 55 pour couvrir un mètre carré de toit. On les dispose comme les ardoises. L'inclinaison du toit doit être de 45° au moins, afin que l'eau n'y séjourne pas.

574. *Plomb.* Les tables de plomb employées à la couverture ont 3m,90 de longueur sur 1m,95 de largeur, et 0m,00338 à 0m,0045 d'épaisseur. Le mètre carré de couverture en plomb de 0m,00338 pèse environ 40 kilog., et 53 kilog. pour celui de 0m,0045 (44).

Le recouvrement des feuilles, dans le sens de la longueur, varie de 0m,081 à 0m,162; latéralement, les feuilles se relient entre elles en les repliant de manière à former un ourlet. On les pose sur voliges; pour cela, on commence par placer les chaîneaux qui doivent régner au bas du comble, on rabat le dossier de ces chaîneaux sur les voliges, et dessus on fixe, par des crochets espacés de 0m,50 les uns des autres, le bas des tables; on déroule les planches en montant, et on les fixe avec de forts clous traversant jusqu'à une certaine profondeur dans les chevrons.

575. *Cuivre.* Les feuilles de cuivre ordinairement employées ont 1m,407 sur 1m,137, et 0m,00068 ou 0m,00075 d'épaisseur; le poids du mètre carré est de 6k,11 avec les premières feuilles et de 7k,64 avec les secondes. Le poids exprimé en livres donne le numéro des feuilles; ainsi les dernières feuilles étant du n° 25, elles pèsent 25 livres ou 12k,24; l'épaisseur est de 4 points ou 0m,00075. Le recouvrement des

feuilles est de 0m,12. Les joints se font comme pour les feuilles de zinc (577).

576. *Tôle de fer*. En Russie et en Suède, on emploie la tôle; les feuilles ont 0m,70 sur 0m,50 et une épaisseur de 0m,00035; elles pèsent 3k,08, ce qui fait 8k,80 par mètre carré.

Depuis le zingage de la tôle, on a fait quelques applications en France d'ardoises en tôle ayant subi cette opération.

Deux pavillons adjacents à la grille de l'Observatoire de Paris sont couverts en ardoises de fonte de fer.

577. *Zinc*. Les assemblages doivent permettre une dilatation facile dans tous les sens. Par le haut, les feuilles se fixent sur les voliges à l'aide de clous en zinc; le fer doit être proscrit, parce qu'il accélère l'oxydation. Par le bas, la feuille recouvre les clous qui fixent la feuille inférieure, à laquelle elle s'agrafe par des crochets que l'on a soudés sous sa face inférieure, comme l'indique la figure 16, planche III. Les crochets peuvent être simplement fixés par les clous de la feuille inférieure, ce qui dispense de les souder (fig. 17).

Latéralement, les feuilles s'agrafent entre elles, soit par un simple ourlet, comme l'indique la fig. 18, soit en redressant leurs bords que l'on applique contre un liteau en bois et en recouvrant le tout d'un chapeau en zinc (fig. 19), ou encore en faisant une double agrafe recouverte d'un chapeau, sans liteau (fig. 20).

Depuis quelques années, on a fait usage d'ardoises en zinc qui ont 0m,35 à 0m,40 sur 0m,30 à 0m,35 de largeur; elles ont la forme des tuiles pannes (fig. 15); elles se clouent par le haut sur les voliges, et s'agrafent par le bas aux ardoises inférieures à l'aide de deux crochets, comme l'indique la figure 16.

Tarif du zinc laminé de la Vieille-Montagne.

NUMÉROS.	ÉPAISSEUR des feuilles.	DIMENSION ET POIDS DES FEUILLES (1).		
		Largeur, 0m.50. Longueur, 2m.00. Surface, 1m.00.	Largeur, 0m 65. Longueur, 2m 00. Surface, 1m.30.	Largeur, 0m.80. Longueur, 2m 00. Surface, 1m.60.
	m.	k	k.	k.
10	0.00051	3.45	4.45	5.50
11	0.00060	4.05	5.30	6.50
12	0.00060	4.65	6.10	7.50
13	0.00078	5.30	6.90	8.50
14	0.00087	5.05	7.70	0.50
15	0.00006	6.55	8.55	10.50
16	0.00110	7.50	9 75	12.00
17	0.00123	8.45	10.05	13.50
18	0.00136	0.35	12.20	15.00
19	0.00148	10.30	13.40	16.50
20	0.00166	11.25	14.60	18.00
21	0.00185	12.50	16.25	20.00
22	0.00202	13.75	17.90	22.00
23	0.00210	15.00	10.50	24.00
24	0.00237	16.25	21.10	26 00
25	0.00256	17.50	22.75	28.00
26	0.00266	18.80	24.40	31.00

(1) On admet une toléraoce de 25 décagrammes en molos dans le poids de chaque feuille.

Emploi des divers numéros de zinc.

Nos 1 à 9. Les feuilles en numéros très-faibles, du no 1 au no 0, a'emploient pour la perforation, pour lea cribles, atores et tamis en zinc, et pour le satinage des papiers. Leur prix et leur fabrication soot exceptionoels.

Ils s'emploient encore pour la fabrication des petits objeta eo zinc, tels que miroirs, porte-mouchettes, éteigooirs, tabletteries, et tous autres objets légera désignés sous le nom d'articles de Paris.

Nos 10 et 11. Ces numéros sont très-employés dans la fabrication des lampes, des lanternes et pour tout co qui conceroe la ferblanterie en général.

Ces numéros s'estampeut encore très-faeilement en ornements divers pour girouettea, clochetona, etc.

Ils s'appliquent aussi le long des murs pour préserver les appartements de l'humidité, et dans les cabinets comme revêtements.

Nos 12 et 13. Le no 12 sert à la fabrication des objets de ménagc, tels que seaux, brocs, arrosoirs, bains de pieda, etc.

Avec ces numéros se font aussi les descentes d'eau pour les petites constructions, les couvertures de hangars ou ateliers provisoires, dea recouvrcments de saillies, corniches, etc.

No 14. Le no 14 est spécial aux toiturea; c'est celui qui doit être employé le plua généralement. Avec ce numéro, une converture bien faite doit donner des résultats toujours satisfaisaots, et durer au moins trente ans sans réparations.

Des numéros au-dessoua ne pourraient faire un service conveuable.

Nos 15 et 16. Ces numéros, en grande dimension, sont employés pour couvertures de monuments, chéneaux, caisses d'eau, bains de siége et fonds de baignoires.

En petites dimensions, ils servent pour doublage de navires aux endroits qui supportent le moins de fatigue.

No 17. En grande dimension, ce numéro s'emploie pour les parois de baignoires, et en petite dimension, pour doublage à l'avant des navires, où le frottement de la lame exige du doublage une grande résistance.

Nos 18 à 26. On emploie ces épaisseurs pour les pompes, la garniture intérieure des cuves à papeteries, des réservoirs et cristallisoirs divers, en usage dans les raffineries, etc.; ils offrent une résistance telle qu'une caisse ainsi doublée doit durer cinquante ou soixante ans.

SIXIÈME PARTIE.

Routes. Ponts. Canaux.

ROUTES.

578. *Division des routes.* On appelle *route*, la partie du sol préparée pour faciliter les communications par terre entre les divers points importants d'un pays. Lorsqu'elle a peu d'étendue, et que les points qu'elle relie sont peu importants, elle prend le nom de *chemin*.

Les routes se divisent en *routes impériales*, qui sont construites et entretenues par l'État, et en *routes départementales*, qui sont établies et entretenues avec les fonds votés par les conseils généraux des départements.

Une route impériale est dite de *première classe* lorsqu'elle unit Paris à un État voisin ou à un port militaire; de *deuxième classe*, lorsqu'elle va de Paris à une des principales villes de France. et de *troisième classe*, lorsqu'elle établit une communication transversale s'étendant sur plusieurs départements. Quelquefois les départements contribuent à l'établissement de ces dernières.

Une route est dite départementale lorsqu'elle unit les villes d'un même département ou de deux départements voisins.

Les chemins vicinaux sont des ramifications qui établissent les communications entre les routes et les différents villages qu'elles ne traversent pas. Il y a encore les *chemins ruraux*, ou de culture, établis dans chaque commune pour faciliter le transport des engrais et des récoltes. Tous ces chemins sont entretenus par les communes intéressées.

579. *Composition d'une route.* Une route se compose :

1° De la *chaussée*, partie centrale consolidée pour résister à l'action destructive des pieds des chevaux et des roues des voitures;

2° Des *accotements*, parties servant à consolider la chaussée de chaque côté, et destinées au passage des piétons et même des voitures pendant la belle saison;

3° Des *fossés* destinés à donner écoulement aux eaux pluviales, ou même à les recueillir si les localités ne permettent pas de leur donner écoulement; on conçoit que dans ce dernier cas ils doivent être plus grands que dans le premier.

Dans le département de la Moselle, outre la chaussée de 6 mètres de largeur, les accotements, qui n'ont que 1 mètre de largeur chacun, et les fossés de $1^m,50$, on a disposé entre un accotement et le fossé voisin un trottoir de $1^m,50$ de largeur pour les piétons. Ce trottoir est établi à $0^m,20$ au-dessus de l'accotement, ce qui fait qu'il n'est jamais dégradé par les voitures. De l'autre côté de la route on a disposé, entre l'accotement et le fossé, des emplacements de 3 mètres de largeur pour approvisionner les matériaux d'entretien.

Si la route, au lieu d'être en tranchée, est en remblai, on remplace les fossés par des talus dont l'inclinaison est de 1,5 de base pour 1 de hauteur.

580. *TABLEAU des dimensions des différentes parties des routes.*

DÉSIGNATION des routes.	LARGEUR			
	de la chaussée. (a)	de chaque accotement.	de chaque fossé. (b)	totale, non compris les fossés. (c)
Routes impériales des trois classes.	$7^m.00$ à $5^m.00$	3^m 50 à $2^m.50$	$1^m.50$	$14^m.00$ à $10^m.00$
Routes départementales.	$5^m.00$ $4^m.00$	$2^m.50$ $2^m.00$	$1^m.60$	$10^m.00$ $3^m.00$
Chemins vicinaux de grande communicat	$5^m.00$ $3^m.00$	$2^m.00$ $1^m.50$	$1^m.00$	$8^m.00$ $6^m.00$

(*a*) la largeur 5 mètres est un peu faible pour les routes impériales;
(*b*) la profondeur des fossés est ordinairement de $0^m.50$;
(*c*) près de Paris, la largeur totale, non compris les fossés, atteint quelquefois jusqu'à 20 mètres.

581. *Pentes de la surface de la route.* La ligne tracée au milieu de la surface de la chaussée est l'*axe* de la route; l'intersection de la route par un cylindre vertical passant par l'axe est le *profil en long*, et une section faite par un plan perpendiculaire à l'axe est un *profil en travers*.

Transversalement, la chaussée se profile suivant un arc de cercle dont la flèche est ordinairement le 1/50 de la corde; il en résulte une pente suffisante pour donner écoulement à l'eau, sans cesser de permettre aux voitures de circuler partout, ce qui évite les ornières. Dans les villes, les rues ont à peu près le même profil entre les ruisseaux. La pente des accotements est en général réglée à $0^m,04$ par mètre.

Si la route est établie sur le penchant d'un côteau, de manière à former précipice d'un côté, on incline toute la surface de la route vers la montagne. Le plus souvent, afin d'éviter encore plus sûrement les

accidents, du côté de la vallée, on borde la route d'un petit mur ou d'un bourrelet en terre couvert de gazon. Un fossé établi du côté de la montagne reçoit les eaux de celle-ci et de la route, pour les déverser du côté de la vallée, si cela est nécessaire, par de petits aqueducs passant sous la route.

Lorsque la route suit le revers d'un coteau, pour éviter, autant que possible, les déblais et remblais, on prend les déblais du côté du coteau pour former les remblais du côté de la vallée; mais il arrive quelquefois, pour éviter des sinuosités trop prononcées, que l'on est obligé de faire entièrement la route en tranchée; dans ce cas, les deux revers de la chaussée sont inclinés vers l'axe pour y amener les eaux, on fait la chaussée plus large, et on supprime les accotements et les fossés si la tranchée est profonde, ce qui diminue considérablement les déblais.

Si la tranchée a peu de longueur et peu de profondeur, on ne supprime que les fossés; on incline les accotements vers la chaussée, et celle-ci vers les accotements, ce qui produit sur chacun de ses côtés un ruisseau pour recevoir les eaux.

Suivant l'axe de la route, la pente maximum est fixée à $0^m,05$ par mètre. Quant à la pente minimum, on est porté à croire que, pour la facilité des transports, la route doit être horizontale; mais comme, malgré la pente transversale, l'eau séjourne encore dans les sillons que laissent les roues des voitures, il convient, pour le bon état de la route, et par suite pour la facilité du tirage des voitures, qu'elle ait une inclinaison longitudinale d'au moins $0^m,005$ par mètre; cette inclinaison suffit pour que l'eau suive l'ornière, et s'accumule en différents points en assez grande quantité pour rompre le bourrelet de l'ornière et prendre un écoulement latéral.

582. *Influence de la pente longitudinale des routes sur le tirage des voitures.* Sur une route horizontale on a

$$R = kP.$$

R force de traction;
P charge totale traînée, voiture comprise;
k rapport de la force de traction à la charge traînée (40).

Théoriquement, sur une route en pente, on a sensiblement (438)

$$R = kP + P \sin \alpha.$$

α angle que fait la route avec l'horizon, α étant très-petit, on peut prendre tangente α, c'est-à-dire la pente, pour sin α, qui alors varie de $0^m.005$ à $0^m.05$.

Les expériences de M. Gordon, *dont le tableau suivant donne les ré-*

sultats, prouvent que la pratique ne s'accorde pas avec la formule précédente.

PENTE PAR MÈTRE.	VALEUR THÉORIQUE de P. pour une même valeur de R.	VALEUR PRATIQUE de P. pour une même valeur de R.	DIFFÉRENCE.
m.			
0.000	11.000	11.000	0.000
0.005	8.800	»	»
0.010	7.333	9.900	2.567
0.020	5.500	8.355	2.855
0.030	4.400	»	»
0.040	3.667	»	»
0 050	3.143	5.859	2.716

Les valeurs théoriques de P consignées dans ce tableau sont calculées dans l'hypothèse de $k = 0.02$, d'où il résulte que l'on a $R = 0.02 \times 11 = 0.22$.

On ne peut attribuer ce grand avantage de la pratique sur la théorie qu'au meilleur état dans lequel se trouve la route à mesure qu'elle est plus inclinée (581), ce qui diminue la valeur de k.

583. *Direction d'une route.* La direction d'une route est déterminée par la position des points principaux qu'elle doit relier, sans avoir égard à la position des points intermédiaires. Le tracé consiste à fixer, soit sur le terrain, soit sur un dessin, la position de tous les points de l'axe de la route, en s'assujettissant à passer par les points qui ont déterminé la direction.

Une route doit traverser le plus grand nombre possible de lieux habités, et surtout commerciaux et manufacturiers, ou en approcher le plus possible, afin de les faire participer aux avantages qu'elle procure. C'est donc d'après des considérations commerciales ou militaires que l'on fixe la direction d'une route; ce qui ne peut être que du ressort de l'administration. Mais comme, aux considérations d'utilité publique, il faut joindre l'économie d'exécution, généralement l'art doit être consulté; ainsi, par exemple, si la route doit traverser un cours d'eau, c'est à l'ingénieur à fixer le point où il sera le plus économique de le passer, en ayant égard à toutes les dépenses et à l'éloignement de la direction fixée par l'utilité. C'est surtout quand la route doit franchir une chaîne de montagnes, que l'ingénieur doit intervenir, pour déterminer le point le plus bas du faîte, afin de diminuer autant que possible les frais de tranchée et rendre les communications faciles.

584. *Considérations générales sur la détermination du point bas d'une chaîne de montagnes.* Pour déterminer le point minimum du faîte d'une chaîne de montagnes, afin de ne pas se jeter dans des nivellements fort pénibles et très-dispendieux, surtout dans les pays

très-accidentés, on se guidera par les considérations suivantes, déduites de principes posés par M. Brisson.

En considérant une portion assez étendue d'un continent, on y remarque des chaînes de montagnes et des cours d'eau, et si on examine attentivement une de ces chaînes, on s'aperçoit qu'il est possible de tracer sur sa crête une ligne telle, que les eaux qui s'y répandent s'écoulent en partie sur l'un des versants et en partie sur l'autre. Lorsque ces eaux coulent dans deux fleuves différents, cette ligne, qui part des côtes de la mer, de part et d'autre de l'embouchure du fleuve, et qui contourne complétement ce fleuve en passant à sa source, prend le nom de *faîte*.

La portion de pays enveloppée par le faîte prend le nom de *bassin*.

Le fleuve suit nécessairement la ligne formée par tous les points les plus bas. Cette ligne prend le nom de *talweg*, mot qui signifie chemin de la vallée.

Le fleuve divise le bassin en deux parties inclinées. La partie placée à droite du fleuve prend le nom de *versant droit*, et celle qui se trouve à gauche, celui de *versant gauche*. La droite du fleuve se trouve à droite de la personne qui descend son cours, c'est-à-dire va de l'*amont* à l'*aval*, et la gauche à sa gauche.

La division la plus naturelle d'un pays est celle en bassins, désignés chacun par le nom du fleuve qui en reçoit les eaux. On emploie cette division pour les affaires qui ont rapport à la navigation; ainsi on distingue les bassins de la Meuse, du Rhin, de la Seine, de la Garonne, du Rhône, etc.

Comme des nivellements seuls peuvent faire reconnaître la véritable position des faîtes, il en résulte que la division en bassins n'a jamais eu d'application politique ni administrative.

Aux chaînes de montagnes dont les faîtes séparent les bassins, et que l'on appelle *chaînes principales*, s'en rattachent d'autres appelées *chaînes secondaires*, dont les faîtes sont à peu près perpendiculaires à celui de la chaîne principale, et à ces chaînes secondaires se rattachent des *chaînes tertiaires*, dont les faîtes sont à peu près perpendiculaires à ceux des chaînes secondaires, et par conséquent parallèles à celui de la chaîne principale.

Deux chaînes tertiaires voisines sont séparées par un talweg qui amène les eaux des versants tributaires dans le talweg qui sépare les deux chaînes secondaires voisines, et ce talweg secondaire conduit les eaux qui y affluent dans le talweg principal. Ces relations, qui existent entre les talwegs et les chaînes de montagnes, et les considérations suivantes, peuvent servir à déterminer *à priori*, à l'aide d'une bonne carte, non-seulement la position d'un faîte, mais aussi son point le plus bas, où par conséquent il convient de faire passer la route :

1° Le faîte d'une chaîne de montagnes, sans avoir rien de géométrique ni dans le sens horizontal ni dans le sens vertical, est cependant à peu près droit dans son ensemble; il est toujours incliné dans le même sens que le talweg;
2° Quand un faîte est rencontré en un même point par deux ou par un plus grand nombre de faîtes secondaires, ce point doit être élevé au maximum;
3° Quand un faîte est rencontré par deux talwegs, le point commun de rencontre doit être un minimum relatif (canaux du Rhône au Rhin et du Languedoc);
4° Quand un faîte est rencontré par un faîte et un talweg secondaire, il offre une inflexion horizontale au point de rencontre, sans avoir rien de remarquable dans le sens vertical;
5° Quand deux talwegs, après avoir été parallèles, divergent dans des sens opposés, le point où ces talwegs prolongés rencontrent le faîte est nécessairement un minimum (canaux de Crozat et de la Sambre à l'Oise);
6° Quand les deux talwegs ont leurs cours parallèles sur une certaine étendue, mais dirigés en sens contraires, le faîte doit présenter un point minimum dans l'intervalle qui sépare les deux sources (canal du Centre).

585. *Tracé d'une route. Nivellement.* Une fois la direction de la route déterminée, d'après les considérations administratives et de géographie physique des nos 583 et 584, il s'agit d'en faire le tracé, c'est-à-dire de déterminer tous les points de son axe compris entre les divers points principaux fixés par la direction.

Pour faire le tracé de la route entre deux points principaux successifs, si de l'un de ces points, ou même d'un point intermédiaire, on peut distinguer toute l'étendue du terrain qui les sépare, on commence par tracer par la pensée l'axe de la route sur le terrain, de manière à avoir les pentes et les contours les plus convenables; on fixe ainsi à peu près la position de la route par rapport à des arbres, des angles de haies, de murs ou de ruisseaux, ou encore à des grosses pierres faciles à distinguer. Cela fait, on parcourt le terrain afin d'en faire une reconnaissance plus complète, et on détermine, à l'aide de jalons, une ligne, dite *ligne d'opération*, que l'on croit devoir adopter pour axe de la route; cette ligne s'écarte ordinairement peu de la première ligne que l'on a supposée, étant au point d'observation.

En fixant ainsi la position approchée de la route, on doit rechercher non-seulement à obtenir le chemin le plus court, à diminuer autant que possible les terrassements sans dépasser la pente maximum 0m.05 pour les routes affectées spécialement aux voitures de roulage, et à éviter tous travaux dispendieux, mais aussi à se placer sur le sol le meilleur, le moins cher, le mieux exposé au soleil et le plus facile à égouter après les pluies. Dans un pays de montagnes, la route doit suivre le fond de la vallée, mais à un niveau supérieur aux inondations, ou le faîte de la chaîne, les ondulations des chaînes secondaires (584) se faisant peu sentir près du faîte. Si la route doit descendre du faîte dans la vallée, on suit le versant d'une chaîne secondaire.

Dans un pays uniforme ou très-légèrement accidenté, il est évident

que la ligne d'opération doit être droite ; mais si le sol est entrecoupé de montagnes, de rivières, de marais, de lieux bâtis, il faut modifier le tracé droit en ayant égard aux considérations précédentes de commodité, d'économie et de solidité.

Lorsque le terrain n'est que très-légèrement accidenté, pour peu que l'on ait d'habileté, on peut fixer assez convenablement la ligne d'opération pour pouvoir l'adopter comme axe de la route ; alors on se contente de faire un nivellement en longueur suivant cette ligne, de rapporter ce nivellement sur une feuille de papier, en adoptant une échelle convenable et une ligne horizontale de comparaison passant au-dessus du point le plus élevé du sol à traverser, et de fixer sur ce profil la position de l'axe de la route par rapport à la surface du sol.

Pour peu que le sol soit accidenté, il ne faut plus s'en rapporter, malgré son habileté, au simple coup d'œil pour fixer la position définitive de l'axe de la route ; on doit faire le plan d'une zone de terrain s'étendant à droite et à gauche de la ligne d'opération, à une distance que ne peut dépasser la route. Pour cela, on fait en des points de la ligne d'opération, convenablement rapprochés et marqués par des jalons ou piquets numérotés, des profils en travers s'étendant sur toute la largeur de la zone à relever. On rapporte sur le papier, à une échelle convenable, le plan de la ligne d'opération et des profils en travers, en indiquant la distance des profils en travers, ainsi que celle entre eux des différents points de chacun de ces profils ; de plus, en chacun de ces points on place la cote de niveau. C'est à l'aide du plan ainsi formé que, dans son cabinet, on étudie la véritable position de la route. Il convient, aux points principaux de ce plan, d'indiquer la qualité du terrain, sa valeur, le nom du propriétaire, et les difficultés d'exécution que l'on y rencontrera.

Pour être à même de former ce plan, il faut donc avoir déterminé sur le terrain :

1° Les distances des piquets de la ligne d'opération, et les cotes du terrain aux points où se trouvent ces piquets ;

2° La distance des piquets de chacun des profils en travers, et les cotes du terrain aux points où se trouvent ces piquets, par rapport au plan horizontal de comparaison adopté pour le profil en long ;

3° L'angle que fait à droite ou à gauche la ligne qui joint un piquet de la ligne d'opération au suivant avec la ligne qui joint ce premier piquet au précédent.

Afin qu'il n'y ait pas confusion, il convient, à mesure que l'on obtient ces résultats sur le terrain, de les inscrire sur deux tableaux tracés à l'avance, et dont nous allons donner les modèles. Le premier est disposé pour le plan et le profil de la ligne d'opération, et le second pour les profils en travers.

1° *Profil en long.*

NUMÉROS des piquets. 1	DISTANCES des piquets. 2	COUPS de niveau. 3	MOYENNES avant 4	MOYENNES arrière. 5	DIFFÉRENCES positives. 6	DIFFÉRENCES négatives. 7	COTES. 8	OBSERVATIONS. 9
	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	
1 (*)	»	1.204 1 196	»	1.200	»	»	100.000	(*) Position du piquet, nature du sol, difficultés d'exécution, nom du propriétaire, angle sous lequel la direction de la ligne d'opération change à droite ou à gauche, etc.
2	38.40	1.798 1 804	1.801	»	0.601	»	100.601	
		1.784 1.778	»	1.781	»	»	»	
3	32.75	2.397 2.403	2.400	»	0.619	»	101.220	
		0.854 0.846	»	0.850	»	»	»	
4	28.45	2.217 2.223	2.220	»	1.370	»	102.590	
		1.807 1.799	»	1.803	»	»	»	
5	29.40	0.496 0.502	0.499	»	»	1.304	101.286	*Vérification.*
Totaux.	129.00		6.920	5.634	2.590	1.304		6.920—5.634= 2.590—1.304= 101.286—100=1.286

Pour obtenir les nombres de la 4ᵉ et de la 5ᵉ colonne, on se place avec le niveau à peu près au milieu de l'intervalle qui sépare deux piquets successifs, et on appelle *coup arrière* le nombre indiqué par la personne qui tient la mire lorsqu'on regarde du côté du point de départ, et *coup avant* le nombre indiqué par la personne qui tient la mire lorsqu'on regarde en avant ; ainsi, dans les exemples du tableau précédent, le niveau étant placé entre les piquets 1 et 2, les coups arrière et avant sont respectivement 1ᵐ,200 et 1ᵐ,801 ; entre les piquets 2 et 3, ces coups sont 1ᵐ,781 et 2ᵐ,400, etc. Comme chaque coup avant ou arrière se prend deux fois, en amenant le dessus de la lunette en dessous, chacun des nombres des 4ᵉ et 5ᵉ colonnes sont les moyennes des deux nombres correspondants de la troisième colonne.

Les différences entre les nombres de la 4ᵉ colonne et ceux de la 5ᵉ qui précèdent immédiatement s'écrivent dans la 6ᵉ ou la 7ᵉ colonne, selon que les premiers nombres sont plus grands ou plus petits que les seconds.

Quant aux nombres de la 8ᵉ colonne, qui expriment les distances des différents points du sol où se trouvent les piquets au-dessous du plan

horizontal de comparaison, pour le piquet n° 1, on prend la cote 100 mètres, ou tout autre nombre tel que l'horizontale menée à la hauteur qu'il exprime passe au-dessus des plus hautes montagnes que l'on peut avoir à traverser. Pour avoir ensuite les cotes des piquets successifs, à la cote 100 mètres du point de départ ou à la dernière cote obtenue on ajoute la différence correspondante de la 6e colonne, ou on en retranche la différence correspondante de la 7e colonne. Ainsi la cote du 2e piquet est $100{,}000 + 0{,}601 = 100^m{,}601$, et celle du piquet n° 5 est $102{,}590 - 1{,}304 = 101^m{,}286$.

Ordinairement le tableau précédent est imprimé sur le recto seulement des feuilles d'un registre, et le verso remplace la colonne des observations.

Pour les profils en travers on opère de la même manière que dans le cas précédent, et on dispose les résultats comme l'indique le tableau suivant. La partie droite de ce tableau comprend les piquets *a*, *b*, *c*, etc., de chaque profil, placés à droite de la ligne d'opération; la partie gauche comprend les piquets *a'*, *b'*, *c'*, etc., placés à gauche de cette même ligne. *a* et *a'* sont les premiers piquets à partir de la ligne d'opération, *b* et *b'* sont les seconds, et ainsi de suite.

Que l'on soit à droite ou à gauche de la ligne d'opération, on considère comme point de départ, pour chaque côté, le piquet de la ligne d'opération. Il convient de remarquer que cela n'oblige pas de commencer le nivellement par ce piquet, mais qu'il faut se rappeler que le coup arrière se donne toujours en regardant vers ce piquet, et le coup avant en lui tournant le dos. En commençant à une extrémité d'un profil, on ne peut calculer les cotes des piquets que quand on est arrivé au piquet de la ligne d'opération, ce qui est du reste sans inconvénient.

2° *Profils en travers.*

GAUCHE.						PIQUETS de la ligne d'opération ou profils en travers.	DROITE.					
OBSERVATIONS.	COTES.	COUPS avant.	COUPS arrière.	DISTANCES des piquets.	PIQUETS des profils.		PIQUETS des profils.	DISTANCES des piquets.	COUPS arrière.	COUPS avant.	COTES.	OBSERVATIONS.
	m. 100.00					1					m 160.00	
		m. 1.40	m 1.20	m. 4.00				m. 3.00	m. 1.05	m. 1.50		
(*) Nature du terrain, difficultés d'exécution, etc.	100.20				a'(*)		a (*)				100.45	(*) Nature du terrain, difficultés d'exécution, etc.
		1.70	1.24	3.16				2.50	1.00	1.50		
	100.66				b'		b				100.95	
		1.78	1.14	5.54				4.50	1.25	2.05		
	101.30				c'		c				101.75	
								3.16	1.16	1.06		
							d				101.65	
								5.25	1 03	2.14		
							e				102.76	
	100.60					2					100.60	
		1.55	1.33	3.17				2.46	1.14	1.74		
	100.82				a'		a				101.20	
		1.59	1.45	4.09				3.40	1.44	1.25		
	100.96				b'		b				101.01	
		1.70	1.55	5.34				6.10	1.30	1.25		
	101.11				c'		c				100.06	
	101.22					3					101.22	

On opérerait de la même manière pour le profil 3 et pour tous les autres que pour les profils 1 et 2. Il est à remarquer que les piquets placés sur la ligne d'opération portent les mêmes cotes que sur le tableau du profil en longueur.

Cotes de points intermédiaires. Le sol entre deux piquets successifs doit avoir une pente uniforme; de sorte que, ayant les cotes c et c' de deux piquets successifs A et B, éloignés entre eux de la quantité d, la cote c'', d'un point intermédiaire situé à la distance d' du piquet A, sera donnée par la formule

$$c'' = c + \frac{d'}{d}(c' - c).$$

Si au contraire on voulait avoir la valeur de d' correspondant à une cote donnée c'', on aurait

$$d' = d\,\frac{c'' - c}{c' - c}.$$

A l'aide des résultats des deux tableaux précédents, on établira le plan de la zone de terrain nivelée; on dessinera un profil en long suivant la ligne d'opération, et sur ce profil on rapportera une ligne indiquant la position de l'axe de la route. Cet axe, d'après sa position par rapport à la surface de sol, donnera un aperçu des quantités de déblais et de remblais à faire, de la distance des transports, et par conséquent des points où il conviendra de modifier le premier profil. Les cotes indiquées sur le plan de la zone nivelée feront prévoir de combien il convient de reporter l'axe de la route à droite ou à gauche de la ligne d'opération, pour avoir le moins possible de déblais et de remblais, et pour que les déblais compensent les remblais avec la moindre distance de transport. Dans ces modifications du premier profil, il ne faut pas perdre de vue que la route doit toujours offrir un aspect agréable et par conséquent être d'une pente autant que possible uniforme, et avoir le moins possible de contours. Ce n'est que la raison d'économie qui fait s'écarter du premier profil que l'œil a choisi comme réunissant le mieux toutes ces conditions.

Une fois que l'on a obtenu un profil satisfaisant, on l'arrête sur le plan de la zone nivelée par une ligne rouge représentant la position de l'axe de la route. Sur le profil en long, l'axe de la route se représente par une ligne rouge avec un petit liséré rouge, et la surface du sol par une ligne noire avec liséré noir; cette ligne noire est supposée droite entre les différents points nivelés. La ligne figurant le plan horizontal de comparaison, ainsi que celles représentant les cotes des points remarquables du terrain et de la ronte, se font en lignes noires pointées.

Une fois le profil en long dessiné à une échelle convenable, de $0^m,001$ à $0^m,002$ ou moins encore par mètre pour les longueurs, et de $0^m,005$ à $0^m,01$ pour les cotes du terrain et de l'axe de la route, on fait le dessin des profils en travers, que l'on étend de part et d'autre de l'espace que doit occuper la route. Sur chacun de ces profils on dessine celui de la route, y compris les fossés et les talus. Ces profils, que l'on fait à une échelle de $0^m,005$ à $0^m,01$ pour mètre, peuvent se placer sur la même feuille, que le profil en long, en regard des points qui leur correspondent, ce qui facilite les comparaisons; mais ordinairement on les dessine sur une feuille séparée, en les éloignant de $0^m,10$ à $0^m,12$, afin d'éviter toute confusion. Comme pour le profil en long, la surface du sol se représente par une ligne noire avec liséré noir, celui de la route et des fossés ou talus par une ligne rouge avec liséré rouge, et la ligne indiquant le plan de comparaison, ainsi que celles représentant les

cotes des points remarquables du profil, par des lignes noires pointées.

Pour dessiner exactement ces derniers profils, il conviendrait de faire de nouveaux nivellements; mais ordinairement on peut les établir à l'aide des cotes fournies par les premiers nivellements.

586. *Cotes rouges. Points et lignes de passage.* On appelle cotes rouges les distances verticales des points de la surface du sol aux points correspondants de la surface du projet. Ainsi l'on déterminera une cote rouge à l'aide d'une simple soustraction, quand on connaîtra les cotes du terrain et du projet au point considéré.

Les cotes des points remarquables du terrain sont données par les nivellements, et celles des points intermédiaires par la formule page 762. Ayant les cotes de la surface du projet, cette même formule servira également à déterminer la cote d'un point intermédiaire.

Si on avait la cote du projet en un point, pour avoir la cote d'un autre point relié au premier par une pente uniforme, et situé à une certaine distance, on ajouterait à la cote du premier point ou on en retrancherait, suivant que la pente irait en descendant ou en montant, le produit de la pente par mètre par la distance horizontale des deux points. Si la pente n'était pas uniforme entre les deux points, on déterminerait successivement les cotes des points intermédiaires d'inflexion, et du dernier de ces points on passerait au point considéré.

On appelle *point de passage*, le point en lequel la ligne du projet rencontre celle du terrain, pour passer de dessus en dessous, ou réciproquement. Ayant les cotes rouges c et c' sur deux verticales A et B reliées par des pentes uniformes et éloignées entre elles d'une distance d, on aura la distance d' de la verticale A au point de passage, à l'aide de la formule

$$d' = \frac{d \times c}{c + c'}.$$

$d'' = d - d'$ sera la distance du point de passage à l'autre verticale B; on pourrait du reste la calculer de la même manière que d'.

Les distances d, d' et d'' sont comptées ensemble suivant la surface du sol, ou celle du projet, ou encore horizontalement.

Lorsque la surface du projet, après avoir été au-dessous du sol, passe au-dessus, ou réciproquement, elle rencontre la surface de ce dernier suivant une ligne continue que l'on appelle *ligne de passage*. Cette ligne se détermine par points, en cherchant les points de passage qui ont lieu sur différents plans verticaux menés parallèlement à l'axe de la route; ces plans se mènent par tous les sommets des angles rentrants ou saillants des surfaces du sol et du projet (587).

587. *Calculs des déblais et remblais.* Après avoir fixé la position de la route et fait tous les profils en travers, il convient de se rendre compte des volumes de déblais et de remblais qu'exige le projet adopté,

afin de modifier ce projet si les déblais ne compensent pas convenablement les remblais, et de se rendre compte du prix de revient des travaux.

Ce travail, qui n'offre aucune difficulté du reste, exige que l'on procède avec ordre, et que l'on dispose convenablement les différents résultats. Pour cela, on commence par considérer les intervalles des profils consécutifs comme étant indépendants les uns des autres, et on calcule les volumes de déblais et de remblais compris entre deux profils en opérant de la manière suivante:

Soient 1 et 2, fig. 21, pl. III, deux demi-profils consécutifs. On mène des plans verticaux parallèles à l'axe de la route par tous les angles saillants et rentrants que présentent les profils de la route et du terrain. Ces divers plans divisent les cubes, de formes plus ou moins bizarres, de déblais et de remblais, en solides d'une régularité suffisante pour qu'on puisse les évaluer avec une exactitude suffisante.

Après avoir mené ces divers plans, on détermine, s'il y a lieu, c'est-à-dire si ces plans coupent à la fois une partie en déblai et une partie en remblai, les divers points de passage (586), et en réunissant ces points par des droites, on obtient les lignes de passage *iki'lmno* et *pqr* de la surface du projet sur la surface du sol. Cela fait, après avoir préparé le tableau suivant, on considère les solides *a* et *a'* détachés par le premier plan parallèle à l'axe. Le solide *a* est une pyramide, désignée par pyramide *a* dans la deuxième colonne du tableau, qui a pour base sa section *stu* sur le profil 1, et pour volume cette base multipliée par le tiers de sa hauteur 31^{m},61, distance du point de passage *k* au profil 1. Le triangle *stu* peut être considéré comme ayant pour hauteur la largeur 1^{m},75, que l'on place dans la troisième colonne du tableau, et pour base la cote rouge 1^{m},68; on prend la moitié 0^{m},84 de cette cote rouge, on l'inscrit dans la quatrième colonne du tableau, et le produit 1^{m},75 $\times$ 0,84 = 1^{m},47 est la surface de la base de la pyramide (*Int.*, 577); on l'écrit dans la cinquième colonne. On prend le tiers 10^{m},54 de la hauteur 31^{m},61 de la pyramide, on inscrit ce tiers dans la sixième colonne du tableau, et le produit 1,47 $\times$ 10,54 = 15$^{m.c.}$,49 est le volume de la pyramide (*Int.*, 746); on l'écrit dans la septième colonne. On opère de la même manière pour la pyramide *a'* et pour celles *c'* et *g'*, en plaçant les cubes dans la septième ou la huitième colonne du tableau, selon que la pyramide est en déblai ou en remblai.

Pour le solide se projetant suivant le trapèze *b*, et inscrit trapèze *b* dans la deuxième colonne du tableau, on le considère comme ayant pour base le trapèze *tuvx*. Ce trapèze a pour hauteur la largeur 0^{m},50, que l'on inscrit dans la troisième colonne, et pour base moyenne la hauteur moyenne $\frac{1,68+1,66}{2}$ = 1^{m},67, que l'on place dans la quatrième colonne; le produit 0,50 $\times$ 1,67 = 0$^{m.c.}$,84 est la surface de la base du

solide *b* (*Int.*, 579). Pour avoir son volume, on remarque qu'on peut le considérer comme étant équivalent à la moitié d'un prisme ayant même base et une hauteur égale à la moyenne $\frac{31,61 + 29,20}{2} = 30^{m},405$, ou à un prisme ayant même base et une hauteur égale à $\frac{30,405}{2} = 15^{m},20$, que l'on écrit dans la sixième colonne. Le produit $0,84 \times 15,20 = 12^{m.c.},69$ est le volume du solide *b* (*Int.*, 744); on l'inscrit dans la huitième colonne. On opère de la même manière pour cuber les solides *b'*, *c*, *c'*, *d*, *d'*, *e*, *g*, *h* et *h'*.

Le solide se projetant suivant le rectangle *f* a une base sur chaque profil, et peut être considéré comme étant équivalent à un prisme ayant pour base la moyenne des bases du solide *f*, et pour hauteur celle de ce solide, c'est-à-dire la distance des deux profils. La base située sur le profil 1 est égale à $1,35\frac{0,68}{2}$, et celle située sur le profil 2, à $1,35\frac{0,35}{2}$; la moyenne de ces surfaces est $1,35\frac{0,68+0,35}{4} = 1,35 \times 0,26 = 0^{m.c.},35$; on placera donc $1^{m},35$ dans la troisième colonne du tableau, $0^{m},26$ dans la quatrième, $0^{m.c.},35$ dans la cinquième et 35 mètres dans la sixième; le produit $0^{m},35 \times 35 = 12^{m},29$ est le volume du solide. Si ce solide, au lieu d'avoir des bases triangulaires, avait des bases trapézoïdales ou une base triangulaire et une base trapézoïdale, on opérerait d'une manière semblable; ainsi, les deux bases étant des trapèzes, en représentant les cotes rouges par *a*, *b*, *c* et *d*, pour une même largeur $1^{m},35$, la base moyenne serait

$$1,35\frac{a+b+c+d}{4}.$$

Si l'une des bases était un triangle, c'est-à-dire si *d* était nul, la base moyenne serait

$$1,35\frac{a+b+c}{4}.$$

Dans tous les cas, la base moyenne multipliée par la distance des profils donne le cube du solide.

Tous les volumes des déblais et remblais que l'on peut avoir à évaluer peuvent toujours se décomposer en des solides semblables à ceux que nous venons d'examiner, et que nous avons distingués par pyramides, trapèzes et rectangles.

TABLEAU des calculs des déblais et remblais.

PROFILS comprenant les solides.	INDICATION des solides.	BASES ou profils des solides. Largeur.	Hauteur.	Surface.	LONGUEURS des solides.	CUBES en déblai.	en remblai.	OBSERVATIONS.
		m.	m.	m.c.	m.	m.c.	m.c.	
1	Pyramide *a*.	1.75	0.84	1.47	10.54	15.49		
	Pyramide *a'*.	0.75	0.09	0.07	1.13	»	0.08	Nature du sol, etc.
	Trapèze *b*. .	0.50	1.67	0.84	15.20	12.69	»	
	Trapèze *b'*. .	0.50	0.26	0.13	2.30	»	0.30	
	Trapèze *c*. .	0.45	1.43	0.64	13.57	8.73	»	
	Trapèze *c'*. .	0 45	0.38	6.17	3.03	»	0.67	
	Trapèze *d*. .	0.70	1.17	0.82	13.46	11.00	»	
	Trapèze *d'*. .	0.70	0.34	0.24	4.04	»	0.96	
	Trapèze *e*. .	0.95	0.02	0.88	15.94	14.03	»	
	Pyramide *e'*.	0.05	0.13	0.12	2.08	»	0.25	
	Rectangle *f*.	1.35	0.26	0.35	35.00	12.29	»	
	Trapèze *g*. .	1.70	0.58	0.09	12.09	12.81	»	
	Pyramide *g'*.	1.70	0 48	0.73	6.01	»	4.39	
	Trapèze *h*. .	1.30	0.70	6.91	6.74	6.13	»	
	Trapèze *h'*. .	1.30	1.18	1.53	10.76	»	16.51	
2	Totaux.					03.17	23.16	

On continuerait de la même manière pour l'autre portion comprise entre les profils 1 et 2. On ne ferait les totaux qu'après avoir calculé tout ce qui sépare deux profils, et on continuerait le tableau pour ce qui est intercepté par les profils 2 et 3, puis 3 et 4, et ainsi de suite.

588. *Méthode expéditive pour calculer les déblais et remblais.* A moins qu'il ne s'agisse de volumes considérables ou d'un sol difficile à attaquer, on peut généralement suivre la méthode que nous allons exposer :

1° La route étant complétement en déblai ou en remblai sur les deux profils, le volume D de déblai ou R de remblai se calcule, comme pour le solide désigné par rectangle *f*, dans la méthode précédente, c'est-à-dire en considérant ce volume comme étant équivalent à celui d'un prisme droit ayant pour hauteur la distance des deux profils, et pour base une moyenne arithmétique entre les surfaces des deux profils.

Ainsi, S étant la surface d'un profil, *s* la surface de l'autre profil et *d* la distance de ces profils, on a

$$D \text{ ou } R = \frac{S+s}{2}\,d.$$

Il n'est pas nécessaire que les déblais ou remblais aient la même largeur sur les deux profils.

2° Si la surface S d'un des profils était complétement en remblai et celle s de l'autre profil complétement en déblai, on supposerait que la distance moyenne d' de la ligne de passage à l'un des profils, à celui en remblai, par exemple, est donnée par la formule du n° 586, dans laquelle les cotes rouges c et c' sont remplacées par les surfaces S et s; on aurait

$$d' = \frac{d \times S}{S + s}.$$

La distance moyenne d'' de la ligne de passage à l'autre profil peut se calculer de la même manière que d', mais on l'obtient en remarquant que l'on a $d'' = d - d'$.

Ayant d', on calculerait le cube R du remblai de la même manière que celui du solide désigné par trapèze b dans la méthode précédente (page 765), c'est-à-dire en le considérant comme étant équivalent à la moitié d'un prisme ayant même base S et même hauteur d', ou encore à un prisme ayant S pour base et $\frac{d'}{2}$ pour hauteur; ainsi on aurait

$$R = S\frac{d'}{2}.$$

Pour les mêmes raisons, on aurait

$$D = s\frac{d''}{2}.$$

3° Si l'un des profils était complétement en déblai ou en remblai, et que l'autre fût partie en remblai et partie en déblai, par le point de rencontre des remblais et des déblais sur ce dernier profil, on mènerait un plan parallèle à l'axe de la route; ce plan diviserait ce qui sépare les deux profils en deux parties: l'une complétement en déblai ou en remblai, et que l'on évaluerait comme au 1°; l'autre en déblai sur un profil et en remblai sur l'autre, et que l'on évaluerait comme au 2°.

4° Si les profils étaient tous deux partie en déblai et partie en remblai, mais que les parties en déblai et en remblai fussent correspondantes sur les deux plans, sans pour cela voir la même largeur, on calculerait le cube des déblais, ainsi que celui des remblais, comme au 1°.

5° Enfin si les profils comprennent des parties en déblai et des parties en remblai, mais ne se correspondant pas sur les deux profils, ce qui est le cas de la figure 21, planche III, pour lequel nous avons formé le tableau page 767, on considère la première surface s du profil 1, qui est en déblai, et la première surface S du profil 2, qui est en remblai, et on calcule les cubes de déblai et de remblai qui correspondent à ces surfaces comme au 2°. Considérant ensuite la seconde surface S' du profil 1, qui est en remblai, et la seconde surface s' du profil 2, qui est en déblai, on calcule également le déblai et le remblai comme au 2°.

Afin de donner une idée de la marche à suivre pour calculer les déblais et remblais, et de la manière de disposer les résultats dans les différents cas que nous venons d'examiner, nous allons former le tableau suivant pour le cas du 5°, c'est-à-dire pour la figure 21.

On considère d'abord la partie qui correspond aux premières surfaces s et S ; c'est ce que l'on indique dans la deuxième colonne du tableau. On calcule ensuite la surface en déblai s en évaluant, d'après les largeurs interceptées entre les différentes cotes rouges menées aux points remarquables du projet et du sol, et les valeurs de ces cotes, les surfaces partielles interceptées par ces cotes; les largeurs partielles s'inscrivent dans la troisième colonne du tableau ; dans la quatrième colonne on place les cotes rouges, ou mieux les valeurs par lesquelles il faut multiplier les largeurs pour avoir les surfaces partielles; ces surfaces partielles s'inscrivent dans la cinquième colonne. La surface totale $s = 5^{m.c.},10$ s'inscrit au bas des surfaces partielles. On calcule de la même manière la surface en remblai $S = 0^{m.c.},73$.

Ayant les surfaces des déblais et des remblais, la distance moyenne d' de la ligne de passage au profil 1 est, d'après ce qui a été dit au 2°, et d étant égale à 35 mètres,

$$d' = \frac{35 \times 5,10}{5,10 + 0,73} = 30^{m},62.$$

$\frac{30^{m},62}{2} = 15^{m},31$ est la longueur du prisme droit ayant s pour base, et dont le volume est équivalent à celui du déblai; on inscrit $15^{m},31$ dans la sixième colonne du tableau.

Le cube du déblai est $5,10 \times 15,31 = 78^{m.cub.},08$; on l'écrit dans la septième colonne.

La distance moyenne d'' de la ligne de passage au profil 2 est $35 - 30,62 = 4^{m},38$, dont la moitié est $2^{m},19$, nombre que l'on pose à la sixième colonne.

Le cube du remblai est alors $0,73 \times 2,19 = 1^{m.cub.},60$, nombre que l'on inscrit dans la huitième colonne.

En opérant de la même manière entre S' et s', on trouve que le volume du remblai y est $20^{m.c.},23$, et celui du déblai $18^{m.c.},13$.

Faisant les totaux des cubes en déblai et des cubes en remblai, on trouve respectivement $96^{m.c.},21$ et $21^{m.c.},83$, nombres différant peu de ceux $93^{m.c.},17$ et $23^{m.c.},16$ trouvés par la méthode exacte (tableau page 767).

PROFILS comprenant les solides.	INDICATION des solides.	BASES ou profils des solides: Largeurs partielles	Hauteurs.	Surfaces.	LONGUEURS réduites.	CUBES en déblai.	en remblai.	OBSERVATIONS.
		m.	m.	m.				
1	De s en S.	1.75	0.84	1.47				
		0.50	1.67	0.84				
		0.45	1.43	0.64				
		0.70	1.17	0.82				Nature du terrain, etc.
		2.30	0.58	1.33				
		Surface en déblai s.		5.10	m. 15.31	m. 78.08		
		1.70	0.22	0.37				
		1.65	0.22	0.36				
		Surf. en remblai S.		0.73	2.19		m. 1.60	
	De S' en s'.	3.00	0.75	2.25				
		Surf. en remblai S'.		2.25	8.99		20.23	
		3.05	0.40	1.22				
		1.30	0.70	0.91				
		Surface en déblai s'.		2.13	8.51	18.13		
2		Totaux.				96.21	21.83	

589. *Méthode approximative pour calculer les déblais et remblais lors de l'étude du projet.* Dans ce cas, afin d'abréger les calculs, on ajoute la surface totale en déblai sur un profil à la surface totale en déblai sur l'autre profil; cette somme, multipliée par la demi-distance des profils, donne le volume du déblai; on calcule de la même manière le cube du remblai. On voit que dans cette méthode les solides s'arrêtant à des lignes de passage sont supposés se prolonger d'un profil à l'autre, ce qui tend à donner des volumes plus forts; mais il vaut mieux obtenir des volumes péchant en plus qu'en moins.

590. *Calcul des déblais et remblais dans les parties courbes.* Dans ce cas, on opère de la même manière que pour une partie droite; seulement, au lieu de partager les déblais et remblais par des plans verticaux parallèles à l'axe, on les divise par des surfaces cylindriques verticales engendrées par une droite verticale qui se meut en s'appuyant

sur des courbes concentriques à l'axe de la route. C'est sur ces directrices que se mesurent les distances des profils, et que l'on calcule les points et les lignes de passage.

Rayon des courbes. Sur une route, le rayon minimum de la courbe de raccordement passant par l'axe varie de 20 à 25 mètres. Cela suffit à la circulation, sur une chaussée de 5 mètres, d'une voiture de 23 mètres de longueur, attelage compris, et de 1m,80 de largeur comptée de dehors en dehors du bandage des roues. Ce rayon varie ordinairement de 50 à 100 mètres.

591. *Évaluation des distances de transport.* La dépense occasionnée par les terrassements dépend non-seulement des volumes de déblais et de remblais, mais aussi de la distance de transport, distance que l'on doit par conséquent chercher à diminuer autant que possible, en suivant des chemins convenables.

La distance moyenne de transport ne peut être moindre que la distance du centre de gravité du déblai à celui de remblai ; elle est souvent plus grande, quand, par exemple, on est assujetti à faire passer les chemins de transport en des points déterminés, et aussi dans les cas analogues à celui où le déblai est pris au centre du remblai. Dans les cas ordinaires de la pratique, on peut prendre comme distance moyenne de transport la distance des centres de gravité.

Il existe plusieurs méthodes pour se rendre compte des dépenses du transport dans un projet de route ou de chemin de fer ou de canal, mais la plus exacte, celle qui rend le mieux compte de tous les détails du transport, est la méthode graphique que nous allons exposer.

Soient 1, 2 et 3, fig. 22, planche III, trois profils successifs, entre lesquels il s'agit de se rendre compte de la nature du transport des terres. Pour cela, on trace une ligne indéfinie AB ; sur cette ligne on prend des points *a*, *b*, *c* espacés entre eux de quantités proportionnelles aux écartements des profils ; ces écartements se prennent à une échelle de 0m,001 à 0m,002 pour mètre ou même à une échelle plus grande, afin de pouvoir mesurer assez approximativement les distances, ce qui dispense dans divers cas de faire des calculs assez longs. Aux points *a*, *b*, *c* on mène des perpendiculaires à AB, au-dessus et au-dessous de cette ligne ; sur ces perpendiculaires, au-dessus de AB, on prend, à une échelle de 0m,005 pour mètre, des longueurs proportionnelles aux surfaces en déblai des profils correspondants ; sur ces mêmes perpendiculaires, on prend, en dessous de AB, et à la même échelle, des longueurs proportionnelles aux surfaces en remblai des profils.

Ainsi, sur le profil 1, la surface en déblai étant 15mq,50, et la surface en remblai 8mq,46, on prend *ad* égal à une longueur représentant 15m,50, et *ae* égal à 8m,46. Sur le profil 2, les surfaces en déblai et en remblai étant respectivement 7mq,40 et 3mq,50, on prend $bf = 7^m,40$ et $bg = 3^m,50$.

Le volume du déblai compris entre les profils 1 et 2 étant égal à la demi-somme de ses surfaces sur ces profils, multipliée par la distance des profils, il est égal à $\frac{13,50+7,40}{2}\times 30 = 343^{mc},50$, valeur qui est représentée en mètres carrés par l'aire du trapèze *abfd*. Par la même raison le volume du remblai compris entre les profils 1 et 2 est égal à $\frac{8,46+3,50}{2}\times 30 = 179^{mc},40$, c'est-à-dire qu'il est représenté par l'aire du trapèze *abge*.

Prenant $ci = 3^m,62$, et joignant *fi*, le point *k* représente la position moyenne de la ligne de passage de la partie en déblai du profil 2 et de la partie correspondante en remblai du profil 3. Le volume du déblai est représenté par l'aire du triangle *bkf* et celui du remblai correspondant, par celle du triangle *cik*. L'autre partie de remblai comprise entre les profils 2 et 3 est représentée par le trapèze *bchg*; de sorte que construisant *hlk'* équivalent au triangle *cik*, ce qui se fait simplement en prenant $hl = ci$, l'aire du polygone *bclkg* représente le volume total de remblai compris entre les profils 2 et 3.

D'abord on a (n°s 586 et 588) $bk = \frac{50\times 7,40}{7,40+3,62} = 33^m,57$, et par suite $kc = 50 - 33,57 = 16,43$. L'aire du triangle *bkf* est alors $\frac{7,40\times 33,57}{2} = 124^{mc},21$, ce qui représente le cube du déblai compris entre les profils 2 et 3.

On a

$$kk' = bg + (ch - bg)\frac{bk}{bc} = 3,50 + (10,40 - 3,50)\frac{33,57}{50} = 8^m,13.$$

L'aire du trapèze $bkk'g = \frac{3,50+8,13}{2}\,33,57 = 195^m,38$; celle du trapèze $kclk' = \frac{8,13+14,02}{2}\times 16,43 = 182,05$, et par suite la surface du polygone *bclk'g* est égale à $195.38 + 182,05 = 377^{m.c.},43$, valeur qui exprime le cube total de remblai compris entre les deux profils 2 et 3.

Examinons maintenant de quelle manière les déblais seront employés pour faire les remblais. Entre les profils 1 et 2, si on prend $am = ae$ et $bn = bg$, on voit que la partie *abnm* du déblai sera employée pour faire le remblai *abge*, sans aucun transport suivant la longueur de la route, mais que le restant de remblai, représenté par le trapèze *mnfd*, et qui est par conséquent égal à $343,50 - 179,40 = 164^{m.c.}10$, devra être transporté entre les profils 2 et 3, et peut-être plus loin. Les parties qui se compensent sans transport longitudinal se distinguent dans la figure par un liséré en hachures.

Entre les profils 2 et 3, le triangle en déblai *bkf* se place directement sur le triangle *bko*, ou mieux sur le polygone *bko'g*, en faisant le trian-

gle $ko'p$ équivalent au triangle opy. Il reste donc entre ces deux profils un excès de remblai représenté par le polygone $kclk'o'$. Comme ce polygone est la différence entre le polygone $bclk'g$ et le triangle bkf, l'excès de remblai est donc $377{,}43 - 124{,}21 = 253^{m.c.}22$; ainsi les $164^{m.c.},10$ d'excès de déblai entre les profils 1 et 2 seront employés à remblayer entre 2 et 3, et il restera encore un excès de remblai égal à $253{,}22 - 164{,}10 = 89^{m.c.},12$. Cet excès est représenté par le trapèze $clqr$, dont il faut d'abord déterminer les dimensions rc et rq.

Lorsque le point r est en c, on a $rq = cl$, et lorsqu'il est en k, on a $rq = kk'$; ainsi, pour un avancement $ck = 16{,}43$, cq a diminué de $cl - kk' = 14{,}02 - 8{,}13 = 5^m{,}89$, ce qui fait $0^m{,}36$ par mètre. Cela étant, on a

$$89{,}12 = rc\,\frac{14{,}02 + 14{,}02 - rc \times 0{,}36}{2},$$

équation de laquelle on peut tirer directement la valeur de rc; mais il est plus commode de déterminer cette valeur par tâtônnement : la surface du trapèze $clqr$ et la valeur de cl font juger quelle sera à peu près la valeur rc; ainsi dans ce cas elle différera peu de $6^m{,}5$; remplaçant dans le second facteur du deuxième membre de l'équation précédente rc par cette valeur, on a

$$89{,}12 = rc\,\frac{14{,}02 + 14{,}02 - 6{,}5 \times 0{,}36}{2}, \quad \text{d'où} \quad rc = 6^m{,}94.$$

Cette valeur étant substituée à son tour dans l'équation, on conclut $rc = 6^m{,}98$, valeur différant très-peu de la précédente et que l'on peut adopter dans la pratique.

On a

$$kr = 16{,}43 - 6{,}98 = 9^m{,}45, \quad \text{et} \quad rq = 14{,}02 - 0{,}36 \times 6{,}98 = 11^m{,}51.$$

Au lieu de déterminer directement la valeur de rc, on aurait pu déterminer celle de kr, en remarquant que la surface du trapèze $krqk'$ est la différence entre les deux trapèzes $kclk'$ et $rclq$, c'est-à-dire égale à

$$182{,}05 - 89{,}12 = 92^m{,}93,$$

et que

$$rq = kk' + 0{,}36 \times kr.$$

Examinons maintenant quelle sera la distance moyenne à parcourir pour transporter le déblai représenté par le trapèze $mnfd$ sur l'espace occupé par le remblai figuré par le pentagone $krqk'o'$. Cette distance est égale à celle des centres de gravité de ces polygones, mesurée suivant AB. Le trapèze $mnfd$ se compose de deux triangles, dont l'un, celui mnf, a son centre de gravité au point C situé à une distance de bf égale à $\frac{30}{3} = 10$ mètres; le triangle mfd a son centre de gravité au point D situé à une distance de bf égale à $2\,\frac{30}{3} = 20$ mètres; le centre

de gravité du trapèze se trouve entre les points C et D à des distances de ces points inversement proportionnelles aux surfaces des triangles ou à leurs bases, ces triangles ayant même hauteur; ainsi, E étant le centre de gravité du trapèze (*Int.*, 1087 et suiv.),

$$CE = \frac{CD' \times md}{md + nf} = \frac{10 \times 7,04}{7,04 + 3,90} = 6^m,43;$$

on a alors

$$Ef = 6,43 + 10 = 16^m,43.$$

Le centre de gravité F du triangle *krk'* est situé à une distance de la ligne *kk'* égale à $\frac{9,45}{3} = 3^m,15$, et celui G du triangle *k'rq*, à une distance de cette même ligne égale à $2 \times \frac{9,45}{3} = 6^m,30$. Comme pour le cas précédent, H étant le centre de gravité du trapèze *rqk'k*, on a

$$HF = \frac{3,15 \times 11,51}{11,51 + 8,13} = 1^m,85,$$

et par suite

$$HT = 3,15 + 1,85 = 5 \text{ mètres}.$$

Il faut maintenant déterminer à quelle distance de *kk'* se trouve le centre de gravité L du triangle *kk'o'*. La surface de ce triangle est égale à celle du trapèze *bkk'g* moins celle du triangle *bkf*, c'est-à-dire à $195,38 - 124,21 = 71^{m\,c},17$; la base *kk'* de ce triangle étant $8^m,13$, sa hauteur est $\frac{71,17}{4,065} = 17^m,51$. On a donc $LT = \frac{17,51}{3} = 5^m,84$, et par suite $LH' = 5,00 + 5,84 = 10^m,84$.

Le centre de gravité P du pentagone *krqk'o'* se trouve entre L et H'; à des distances de ces points qui sont en raison inverse des surfaces du triangle *kk'o'* et du trapèze *krqk'*, de sorte qu'on a

$$H'P = \frac{10,84 \times 71,17}{71,17 + 92,93} = 4^m,70,$$

et

$$TP = 5,00 - 4,70 = 0^m,30.$$

La distance moyenne de transport est

$$Ef + bk + TP = 16,43 + 33,57 + 0,30 = 50^m,30.$$

Tous ces calculs peuvent être abrégés en faisant la figure à une échelle plus grande, ce qui permet, lorsqu'on n'a pas besoin d'une évaluation rigoureuse, de prendre les longueurs à l'échelle sans les calculer, et même de fixer à vue d'œil la position des centres de gravité.

A l'aide du dessin des profils et d'un des tableaux pages 767 et 770 on peut se rendre compte exactement des quantités de terre à transporter longitudinalement, et plus ou moins approximativement de la distance moyenne de transport, sans qu'il soit nécessaire de faire le tableau graphique.

592. *Influence des rampes sur les distances de transport.* Il est évident qu'une rampe ascendante du déblai au remblai augmente le travail, puisque, outre le travail dépensé pour le transport horizontal, il faut encore élever les matériaux. Des ingénieurs admettent que le travail est le même pour monter une rampe de 20 mètres de base sur 2m,50 de hauteur (inclinée au 1/8), que pour parcourir une distance horizontale de 30 mètres. La pente 1/8 exigeant un travail au-dessus des forces de l'homme, il convient d'adopter, comme dans les travaux du génie militaire, une rampe au 1/12, et de considérer comme équivalent de la distance horizontale 30 mètres, une rampe de 20 mètres de base sur 1m,65 de hauteur. Ainsi, considérant que pour s'élever de la hauteur H il faut parcourir une rampe de 12 H de base, comme 20 mètres de cette rampe équivalent à 30 mètres de transport horizontal, un mètre équivaut à 1m,50, et les 12 H, à $12 \text{H} \times 1{,}50 = 18\text{H}$, ce qui revient à ajouter 6H à l'espace réellement parcouru horizontalement, sans que cet espace horizontal soit jamais inférieur à 12 H; dans le cas où un chemin direct donnerait un espace moindre, on adopterait un chemin composé de deux, ou plus si cela était nécessaire, directions se raccordant de manière que l'ouvrier pût facilement passer de l'une à l'autre avec sa brouette.

Soit ABCD, figure 23, planche III, une fouille dont les terres sont destinées à former le cavalier EFHI, G le centre de gravité de la fouille, G' celui du remblai et h, h' les distances verticales de ces centres de gravité à l'horizontale AI. Pour amener au point D les terres de la fouille, il faut développer le même travail que si toute la masse était concentrée au point G; par conséquent le travail développé est le même que pour transporter la masse à une distance horizontale égale à 18 h; par la même raison, le travail développé pour amener les terres depuis le point E jusqu'aux différents points du cavalier est le même que pour parcourir un espace horizontal égal à 18 h'; le travail total produit équivaut donc à un transport horizontal à une distance $18(h + h') + \text{DE}$. On est obligé de laisser des rampes pour élever les terres, soit de l'intérieur de la fouille au point D, soit du point E aux différents points du cavalier; comme ces rampes sont ordinairement espacées de 20 mètres entre elles, il en résulte que chacune d'elles reçoit les terres jusqu'à une distance de 10 mètres de chaque côté; ce qui exige encore, pour toute la masse, un transport horizontal à une distance moyenne de 5 mètres, et comme ce transport se reproduit pour former le cavalier comme pour faire la fouille, il en

résulte que l'accroissement total de la distance de transport est de 10 mètres; par conséquent la distance totale de transport est 18 $(h+h')$ $+$ DE $+$ 10 mètres.

Soit, même figure, DK et EL deux lignes inclinées au 1/12. Si le sol permet partout la circulation de la brouette, on pourra enlever la portion AKD sans s'astreindre à venir passer sur des rampes espacées de 20 mètres, ce qui diminuera, pour cette portion, la distance de transport de 5 mètres; on peut produire la même diminution sur le cavalier pour la partie EIL; cette considération n'est pas à négliger quand la fouille est très-large et peu profonde. Quoi qu'il en soit, comme il y a avantage de suivre des rampes, surtout sur les terres remuées, parce que le sol y prenant de la consistance le transport y devient plus facile, dans les circonstances ordinaires du transport en pente, on prend pour distance horizontale de transport 18 fois la différence de niveau des centres de gravité de la fouille et du remblai, plus la distance du bord de la fouille au pied du cavalier, plus encore 10 mètres pour le transport normal aux rampes; de sorte que dans l'exemple précédent, V étant le cube de terre transporté, le travail produit peut être exprimé par V [18 $(h+h')+$ DE $+$ 10].

Si le sol allait en s'élevant de A vers I, $h+h'$ exprimerait, comme dans le cas d'un sol horizontal, la différence de niveau des centres de gravité G et G'; si au contraire le sol allait en s'abaissant de A vers I, on remplacerait 18 $(h+h')$ par la somme de la distance horizontale du centre de gravité G au point D et de celle du centre de gravité G' au point E, augmentée de 6 fois la distance verticale du point D audessus du centre de gravité G, plus 6 fois la difference positive de niveau du centre de gravité G' et du point E; c'est également la valeur que l'on substituerait à 18 $(h+h')$ dans le cas où les lignes GD et G'E seraient inclinées à moins de 1/12; dans ce dernier cas on augmenterait la valeur de DE de 6 fois la hauteur verticale du point E audessus de D.

Dans les différents cas que nous venons d'examiner, nous avons tenu compte de l'excès de travail dû à une rampe ascendante; mais nous avons négligé l'effet d'une rampe descendante. Dans le transport à la brouette, comme l'ouvrier fatigue peut-être un peu moins en descendant, mais qu'il fatigue beaucoup plus en remontant, à vide il est vrai, la pente descendante ne peut être très-favorable; mais dans le transport au moyen du camion, du tombereau ou du wagon, cas où le moteur ne porte pas la majorité de la charge comme avec la brouette, il convient de tenir compte de l'inclinaison (582).

593. *Exécution des fouilles.* Il n'y a guère que des expériences directes qui permettent d'évaluer le prix à assigner à un volume déterminé de fouille; ainsi il y a des terres qui sont attaquées facilement avec la bêche ordinaire ou le louchet, d'autres ne le sont qu'avec la

pioche, et de plus dures, avec le pic; les rocs exigent l'emploi des outils du carrier et quelquefois celui de la poudre.

La terre végétale, le sable et la tourbe sont les seules matières que partout on peut attaquer à peu près aussi facilement avec la bêche ou le louchet; on admet qu'un ouvrier peut facilement en fouiller et charger dans des brouettes 15 mètres cubes par jour de 10 heures de travail. On admet également qu'un ouvrier peut jeter ces mêmes cubes à 3 ou 4 mètres de distance horizontale, ou à une hauteur verticale de 1m,65; cependant ce dernier travail étant un peu plus fatigant, il y a lieu de le payer un peu plus cher.

Dans les travaux du génie militaire, si un homme suffit pour charger une brouette pendant qu'un homme parcourt un relai horizontal de 30 mètres, on dit que la *terre* est *à un seul homme*; si un homme ne suffit pas, et que, par exemple, pour deux meneurs il faille deux chargeurs et un piocheur, la *terre* est *à un homme et demi;* la *terre* peut être *à deux, à trois, etc. hommes.* On conçoit que les prix doivent être différents pour ces diverses espèces de terre.

Afin de se rendre bien compte de la catégorie à laquelle appartient la terre que l'on a à fouiller lorsqu'il s'agit de fixer le prix à accorder aux entrepreneurs, on fait piocher un certain volume de terre, en l'amenant à l'état de pouvoir être chargée à la pelle, par un ouvrier que choisit la partie qui doit faire exécuter, et on fait charger cette terre par un ouvrier qui reçoit, lui, ses instructions de l'entrepreneur. Si T est le temps qu'a mis le premier ouvrier pour piocher, et que t soit celui qu'emploie le second pour charger la même terre, il en résulte que $\frac{T}{t}$ est le nombre des piocheurs nécessaires pour entretenir un chargeur; il faudra donc avoir $\frac{T}{t}+1=\frac{T+t}{t}$ ouvriers à la fouille pour occuper un meneur d'une manière continue; par conséquent la *terre* est *à* $\frac{T+t}{t}$ *hommes.* Il est à remarquer que dans cette expérience chacune des parties intéressées fournissant l'ouvrier qui travaille dans le sens de ses intérêts, l'une et l'autre ont sujet d'être satisfaites.

594. *Transport des terres.* Le transport des terres se fait en les jetant à la pelle lorsque la distance n'est que de quelques mètres (593); mais lorsqu'elle est plus considérable, on fait usage de brouettes, de camions, de tombereaux, de bourriquets et de wagons roulant sur rail-ways (398).

1° *Transport à la brouette.* La capacité des brouettes varie ordinairement de 1/25 à 1/33 de mètre cube. Quant à la charge en terre, elle varie de 60 à 100 kilog., et elle est habituellement de 70 kilog.

Dans un chantier bien organisé, il ne faut pas que des ouvriers soient inoccupés pendant que les autres travaillent. Pour une terre fa-

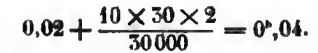
cile, un ouvrier chargeant 15 mètres cubes de terre en 10 heures de travail, c'est-à-dire en 36000 secondes, pour charger une brouettée de $0^{m},03$ cube, il emploiera $\frac{36000 \times 0,03}{15} = 72'' = 1' 12''$.

Un meneur parcourant 30000 mètres dans une journée de 10 heures de travail, c'est-à-dire en 36000", en 72" il parcourra une distance de $\frac{30000 \times 72}{36000} = 60$ mètres. Comme cette distance comprend une allée et une venue, il en résulte que l'étendue d'un relais ne sera que de 30 mètres; c'est l'étendue généralement adoptée, et qui paraît la plus favorable au travail. Cependant, comme il y a des cas où le relais ne peut être réglé à 30 mètres, celui. par exemple, où la distance de transport est moindre que 60 mètres, alors on règle la capacité de la brouette d'après la distance à parcourir; ainsi le relais étant de 50 mètres, ce qui fait une distance de 100 mètres pour l'allée et la venue, l'ouvrier parcourant toujours 30000 mètres en 10 heures, il parcourra un relais en $\frac{36000 \times 100}{30000} = 120'' = 2'$; pendant ce temps, le chargeur placera dans la brouette $\frac{15 \times 2}{600} = 0,05 = 1/20$ de mètre cube de terre, contenu dont la brouette devra être capable. Par un calcul semblable, on trouverait que le relais étant de $28^{m},50$, le contenu de la brouette ne doit être que de 1/35 de mètre cube.

En nous plaçant dans les conditions ordinaires, un ouvrier transportant dans sa journée de dix heures 15 mètres cubes de terre à une distance de 30 mètres, il en résulte que si sa journée lui est payée 1 fr. 50 cent., le prix du transport d'un mètre cube à 30 mètres sera de 0 fr. 10 cent.; à 60 mètres il faudrait un second rouleur, et le prix deviendrait 0 fr. 20 cent.; à 90 mètres, ce prix serait 0 fr. 30 cent., et ainsi de suite, le prix croissant comme la distance. Si on voulait avoir le prix total de la fouille et du transport, il suffirait d'ajouter à chacun des prix précédents le 1/15 de la journée de l'homme ou des hommes qui, employés à la fouille, entretiennent le rouleur.

2° *Transport au camion.* Le camion est un petit tombereau ordinairement traîné par trois hommes, et pouvant contenir alors $0^{m.c.},20$ de terre.

S'il n'y avait pas de temps d'arrêt, le camion parcourrait 30000 mètres en 10 heures, et comme il faut compter sur 50 à 60"; soit $0^{h},02$ pour s'atteler au camion, le décharger et le remettre en marche, il en résulte que le temps employé pour transporter le contenu $0^{m.cub.},20$ du camion à une distance de 30 mètres est



$$0,02 + \frac{10 \times 30 \times 2}{30000} = 0^{h},04.$$

Pour transporter un mètre cube à la même distance, il faudra donc

$$\frac{0{,}04\times 1}{0{,}2}=0^{h},2.$$

Si la distance de transport est de 60 mètres, le transport d'un camion exigera

$$0{,}02+\frac{10\times 60\times 2}{30000}=0^{h},06,$$

ce qui fait $\frac{0{,}06}{0{,}2}=0^{h},3$ par mètre cube.

A une distance de 90 mètres, ces temps seraient respectivement $0^{h},08$ et $0^{h},4$.

Supposant, comme avec la brouette, que chaque ouvrier gagne 1 fr. 50, ce qui fait 4 fr. 50 pour la journée des trois rouleurs, ou 0 fr. 45 par heure, il en résulte que le prix du transport d'un mètre cube à 30, 60, 90 mètres est respectivement $0^{f},09$, $0^{f},135$ et $0^{f},18$; ce qui montre que l'avantage du camion sur la brouette croît avec la distance. Ces prix font voir aussi que, même à 30 mètres, il y a avantage à employer le camion au lieu de la brouette (1°); cependant on n'en fait pas usage pour des distances de moins de 100 mètres.

Un ouvrier chargeant 15 mètres cubes de terre en 10 heures, deux ouvriers mettront $\frac{10\times 0{,}2}{15\times 2}=0^{h},067$ pour charger le contenu $0^{m.c.},2$ du camion. Ce temps, comparé à celui de $0^{h},08$ que mettent les rouleurs pour parcourir un relais de 90 mètres, fait voir que pour une terre aussi facile on pourrait à la rigueur fixer le relais à moins de 90 mètres; cependant il convient de le fixer à 100 mètres, afin de soulager les chargeurs, qui fatiguent évidemment plus pour jeter la terre sur un camion que sur une brouette.

3° *Transport au tombereau.* Pour transporter les terres à une grande distance, on fait usage de tombereaux, qui sont ordinairement attelés de un cheval et ont alors une capacité de $0^{m.c.},50$; dans quelques localités on les fait plus grands; ainsi à Paris on en voit qui cubent de $1^{m},00$ à $1^{m},50$, et qui sont le plus souvent traînés par deux chevaux.

Le temps nécessaire au transport au tombereau peut se diviser en trois parties distinctes:

1° *Le temps nécessaire au chargement.* En supposant toujours qu'un homme puisse charger 15 mètres cubes de terre en 10 heures de travail (dans le plus grand nombre de cas il convient de réduire ce nombre à 12 mètres cubes), si on représente par C la capacité du tombereau, et par N le nombre des chargeurs, ce temps sera $\frac{10\times C}{15\times N}$. Le nombre N ne doit pas dépasser 3, car autrement les chargeurs se gêneraient, et il comprend le conducteur, qui travaille comme chargeur.

2° *Le temps nécessaire au mouvement.* Un cheval attelé à un tombereau parcourant 30000 mètres en 10 heures, pour parcourir R relais de 80 mètres il mettra $R\frac{10\times 60}{30000}=R\times 0.02$ heures.

3° *Le temps employé au déchargement et à la mise en marche du tombereau.* Ce temps est évalué à $0^h.033$.

Ayant ces différents temps pour une capacité C de tombereau, pour avoir ceux nécessaires au transport d'un mètre cube de terre, il suffit de multiplier ces premiers par le rapport d'un mètre cube à la capacité C, et en faisant la somme des valeurs obtenues on aura le temps T nécessaire au transport d'un mètre cube à R relais; ainsi,

$$T=\frac{\frac{10\times C}{15\times N}+R\times 0{,}02+0{,}033}{C}.$$

Supposant $N=3$, $R=3$ et $C=0^{mc},50$, cette formule donne $T=0^h,408$. La journée d'un cheval et de son conducteur étant payée 6 fr., et celle de chacun des deux chargeurs 1 fr. 50 cent., ce qui fait une dépense de 9 fr. par jour ou de 90 cent. par heure, le transport du mètre cube de terre à 3 relais revient à $0^f,90\times 0,408=0^f,3672$, prix beaucoup plus élevé qu'avec la brouette et le camion (1° et 2°).

Un travail organisé ainsi que nous venons de le supposer serait vicieux, puisque les deux chargeurs se reposeraient pendant toute la durée du mouvement et de la décharge du tombereau. Pour éviter cela, il faut employer deux tombereaux, dont l'un est en charge pendant que l'autre va à la décharge; de cette manière, le travail journalier du second tombereau, travail égal à celui du premier, ne doit être évalué qu'à 6 fr., ce qui donne pour prix du transport d'un mètre cube de terre à 3 relais $0,60\times 0,408=0^f,2448$; la moyenne du prix d'un mètre cube à 3 relais est donc pour les deux tombereaux

$$\frac{0{,}3672+0{,}2448}{2}=0^f{,}306.$$

Pour que les chargeurs ne perdent pas de temps, il suffit que le nombre R de relais soit tel, que le temps de la charge soit égal au temps employé au mouvement et à la décharge, et que l'on ait par conséquent

$$\frac{10\times C}{15\times N}=R\times 0{,}02+0{,}033;$$

d'où l'on tire, pour le cas où $C=0^{mc},50$ et $N=3$, $R=3,9$ relais. Dans le cas où il n'y a qu'un chargeur avec le conducteur, ce qui fait $N=2$, cette formule donne $R=6,7$ relais.

Dans le transport au tombereau, les rampes ne doivent être inclinées qu'au 1/20, et on ne prend tout de même pour l'équivalent d'un relais

horizontal de 30 mètres qu'une portion de rampe de 20 mètres de base, et par conséquent de 1 mètre de hauteur (592).

4° *Transport au bourriquet.* Lorsqu'on a à élever des terres verticalement, on peut placer des ouvriers à des étages différents espacés de $1^{m},65$, et compter que chaque ouvrier, en 10 heures de travail, peut jeter 15 mètres cubes de terre d'un étage à l'étage supérieur. On peut aussi disposer des rampes s'élevant de $1^{m},65$ pour 20 mètres de base, ce qui équivaut à un relais horizontal de 30 mètres; ces deux manières d'opérer font voir que l'on doit adopter la hauteur verticale $1^{m},65$ pour relais.

Dans un grand nombre de cas, on est obligé d'élever les terres tout à fait verticalement; on fait alors usage d'un treuil, que l'on nomme bourriquet. L'arbre du treuil a ordinairement $0^{m},20$ de diamètre et 1 mètre de longueur, la manivelle a $0^{m},40$ de rayon, le diamètre de la corde est de $0^{m},03$, la caisse ou panier destiné à recevoir les terres à élever a $0^{mc},033$ de capacité.

Le panier mettant 20 secondes ou $0^{h},00556$ pour s'élever de 5 mètres, pour monter d'un relais il emploiera $\frac{0,00556 \times 1,65}{5} = 0^{h},00183$; comme il descend de 5 mètres en 15 secondes ou $0^{h},00417$, la descente d'un relais durera $\frac{0,00417 \times 1,65}{5} = 0^{h},00138$. De ces nombres, comme de plus il faut $20'' = 0^{h},00556$ pour décrocher un panier plein et en accrocher un vide, et $25'' = 0^{h},00695$ pour vider le panier, il résulte que pour élever le contenu $0^{m.cub.},033$ du panier à une hauteur de R relais, il faut un temps représenté par

$$t = R\,(0,00183 + 0,00138) + 0,00556 + 0,00695 \text{ heures.}$$

Si $R = 3$, par exemple, on conclut $t = 0^{h},02214$.

Le temps nécessaire pour élever un mètre cube est $T = \frac{t \times 1}{0,033}$, et quand $R = 3$, on a $T = \frac{0,02214 \times 1}{0,033} = 0^{h},671$.

Pour manœuvrer une telle machine il faut cinq hommes: un pour remplir le panier, deux pour tourner les manivelles, et deux autres pour décrocher le panier et le vider; ces quatre derniers alternent leur travail. Supposant que la journée d'un ouvrier soit payée 1 fr. 50 c., ce qui fait $0^{f},75$ pour une heure de cinq ouvriers, chaque mètre cube de terre élevé à trois relais coûtera $0,75 \times 0,671 = 0^{f},503$.

Trois ouvriers étagés à $1^{m},65$ l'un au-dessus de l'autre suffiraient pour élever, à l'aide de la pelle, 15 mètres cubes de terre par jour; l'élévation de ces 15 mètres cubes coûterait donc 4 fr. 50 c., ce qui ne ferait que $0^{f},30$ par mètre cube; il faut donc, quand cela est possible, substituer ce mode à l'usage du bourriquet.

5° *Transport par chemins de fer.* Au chemin de fer de Saint-Germain, pour les tranchées des Batignolles, les wagons étant remorqués par des chevaux et la distance de transport étant de 1000 à 1500 mètres, le prix du transport de 1 mètre cube à 1000 mètres s'est divisé en :

	fr.
Transport proprement dit	0.20
Réparation et graissage des wagons	0.08
Dépréciation	0.03
Total	0.31

La décharge est revenue à 0f,15 par mètre cube, y compris les chevaux qui conduisaient les wagons de la gare la plus voisine à la décharge.

La distance de transport ayant été de 3000 mètres, on a fait usage de locomotives, et le prix du transport d'un mètre cube à 1000 mètres s'est divisé en :

	fr.
Transport proprement dit, c'est-à-dire salaire des mécaniciens, combustible et réparations	0.10
Réparation des wagons	0.24
Dépréciation des wagons	0.03
Total	0.37

La décharge des wagons est revenue, par mètre cube, à :

	fr.
Chevaux employés à traîner les wagons du point où les déposaient les locomotives jusqu'à la décharge et les ramener	0.18
Ouvriers	0.08
Total	0.26

Ainsi, sous le point de vue de l'économie, il y aurait avantage à remorquer les wagons par les chevaux ; mais les travaux s'exécutent avec moins de rapidité.

Nous allons donner un aperçu de la manière dont se sont divisées les dépenses de la tranchée de Clamart, chemin de fer de Versailles (rive gauche), d'après les séries de prix établies par M. Brabant. Les nombres qui suivent sont extraits du *Portefeuille de l'ingénieur des chemins de fer*, de MM. Perdonnet et Polonceau.

Le cube total des déblais était de 378 000 mètres cubes ; mais comme les trois quarts seulement ont été transportés d'un même côté de la tranchée, à une distance supérieure à 1000 mètres, les prix suivants sont établis dans l'hypothèse d'un volume de 300 000 mètres à transporter à une distance de 1000 mètres.

L'accélération des travaux a dû faire sacrifier l'argent pour économiser le temps (les travaux devant être terminés en vingt mois, il a fallu effectuer un transport de 600 mètres cubes par journée de 10 heures de travail).

Les wagons contenaient $1^{mc},50$ de terre et descendaient pleins un chemin incliné de $0^{m},004$ par mètre. Trois chevaux en remorquaient 10 à la vitesse de 25 000 mètres par jour, et une locomotive dont les pistons avaient $0^{m},25$ de diamètre en traînait 20 à la vitesse de 100000 mètres par jour de 10 heures.

On a compté pour le temps perdu à la charge et à la décharge 10 minutes par voyage, quels que soient le mode de traction et la distance de transport.

Le transport s'effectuant avec des chevaux, il a fallu, pour 600 mètres cubes à transporter par jour, 150 wagons (80 à la charge et décharge, 40 sur la voie, 10 à la réserve et 20 en réparation). Avec les locomotives, il a fallu 132 wagons (80 en charge et décharge, 20 sur la voie, 10 en réserve, 20 en réparation et 2 wagons intermédiaires). Le nombre des locomotives doit être double de celui nécessaire; ainsi, pour une que l'on avait en marche, il en fallait une seconde en réserve ou en réparation.

Prix du transport d'un mètre cube de déblai à une distance de 1000 mètres, sur un chemin dont la pente est de $0^{m}.004$ par mètre, les wagons étant remorqués par des chevaux.

Intérêt à 5 pour 100 de 375000 fr. qu'a coûté le matériel d'exploitation, et dépréciation de ce matériel, ...	fr. 0.4625
Entretien du matériel.	0.2000
Le matériel d'exploitation comprend 150 wagons de terrassement à 650 fr. pièce, 3000 mètres de doubles voies en fer à 80 fr., 40 changements de voies provisoires à 225 fr. pièce, hangar, bâtiment, outils, 2 échafauds de décharge.	
Pose, démontage et entretien des voies provisoires.	0.0873
Transport des déblais.	0.3246
Ce transport exige 8 chevaux, payés 48 fr. par jour, pour conduire les wagons au point où ils doivent être pris par les chevaux chargés du transport; 3 chevaux et 2 conducteurs, payés 24 fr. par jour, par chaque 10 wagons portant 15 mètres cubes de terre à 25000 mètres par jour; 10 minutes de temps perdu (temps pendant lequel les 3 chevaux et les conducteurs ne marchent pas); 12 ouvriers pour pousser et décrocher les wagons, 30 fr. par jour; aiguilleurs, nettoyeurs de rails et graisseurs, 12 ouvriers payés 24 fr. par jour.	
Fouille et charge.	0.6000
Reprises et jets à la pelle ou transports en brouettes nécessaires pour charger en wagons.	0.3000
Déchargement et manœuvre des ponts de décharges, 24 ouvriers à 84 fr. par jour.	0.1400
Dépenses diverses (manœuvres pour travaux divers, 16 ouvriers à 40 fr. par jour; surveillants et gardiens, 10 employés à 30 fr. par jour). . . .	0.1167
Total.	2.2311

Pour un supplément de transport à 1000 mètres, l'excès de dépense n'est que de $0^{f},0402$.

Sur un chemin horizontal, au lieu de 3 chevaux pour conduire 10 wa-

gons, il en faudrait 5, ce qui porterait le prix du mètre cube transporté à 1000 mètres à 2f,3085, et l'excès par 1000 mètres de distance en plus, à 0f,0467.

Si le chemin montait de 0m,004 par mètre, il faudrait 8 chevaux et 2 conducteurs payés 54 francs par jour, ce qui porterait les prix précédents à 2f,4243 et 0f,0564.

Quand les wagons sont remorqués par une locomotive, il faut 132 wagons, 2 locomotives du prix de 35000 francs pièce, 12 chevaux pour amener les wagons au point où la locomotive peut les prendre. La locomotive, estimée être de la force de 10 chevaux, produit une dépense journalière évaluée à 101 francs. Ces diverses dépenses font que le prix du transport d'un mètre cube à 1000 mètres est de 2f,3005 sur un chemin descendant de 0m,004 par mètre, 2f,3728 sur un chemin horizontal, et 2f,5137 sur un chemin dont la pente ascendante est de 0m,004 par mètre. Pour ces divers chemins, l'augmentation de dépense pour un excès de 1000 mètres de distance de transport est respectivement 0f,0344, 0f,0391 et 0f,0466.

En effectuant le transport par plans automoteurs, ce qui est nécessaire toutes les fois que les déblais doivent être descendus à une grande profondeur, il faut le même nombre de wagons qu'avec des chevaux, 12 conducteurs de wagons et 15 chevaux, et le prix du transport du mètre cube à une distance de 1000 mètres est de 2f,2861. Ce prix a été établi dans l'hypothèse où le plan automoteur a 200 mètres de longueur et 0m,05 de pente par mètre; cela suffit pour que les wagons acquièrent une impulsion nécessaire pour parcourir ensuite une distance de 800 mètres; ils pourraient même franchir un espace plus long; mais alors il faudrait leur laisser prendre sur le plan une vitesse qui serait dangereuse.

D'après les résultats précédents, et en supposant qu'un tombereau attelé de 2 chevaux serait payé 14 francs par jour de 10 heures, y compris le conducteur; que le temps perdu à la charge et à la décharge serait de 1/40 de jour, que deux chevaux pourraient traîner 0m.c.,80 ou 1 mètre cube de terre en parcourant 36000 mètres par jour, selon que le chemin serait en terre ou serait une route bien entretenue, MM. Perdonnet et Polonceau ont établi le tableau suivant :

TABLEAU du prix de revient du transport de 1 mètre cube de déblai à une distance de 1000 mètres sur des chemins horizontaux.

DISTANCES de transport.	TRANSPORT AU TOMBEREAU		TRANSPORT EN WAGONS traînés par des	
	sur chemins en terre.	sur routes entretenues.	chevaux.	locomotives.
m.	fr.	fr.	fr.	fr.
1000	2.2195	1.7580	2.3085	2.3728
1500	2.7955	2.1470	2.5420	2.5783
1600	2.9107	2.2248	2.5887	2.6174
1700	3.0259	2.3026	2.6354	2.6565
1800	3.1411	2.3804	2.6821	2.6956
1900	3.2563	2.4582	2.7288	2.7347
2000	3.3715	2.5360	2.7755	2.7738
3000	4.5235	3.3140	3.2425	3.1648
4000	5.6755	4.0920	3.7095	3.5508
4500	6.2515	4.4810	3.9430	3.7513
4600	6.3667	4.5588	3 9897	3.7904
4700	6.4819	4.6366	4.0364	3.8295

Ce tableau fait voir que, sous le rapport de l'économie, l'usage des wagons n'est plus avantageux que celui des tombereaux que pour des volumes de déblais considérables et pour des distances de transport supérieures à 1000 mètres; cependant on y a souvent recours pour des distances moindres, parce que les chemins en terre sont impraticables avec des tombereaux par les temps humides, au lieu qu'avec des wagons et des voies en fer on est rarement obligé d'interrompre les travaux.

Il est à remarquer que l'on peut diminuer notablement les prix du tableau précédent quand les circonstances n'exigent pas, comme dans la vallée de Clamart, une exécution aussi rapide.

Le plus habituellement, pour les grands terrassements, on fait usage de la brouette pour les distances de transport de moins de 100 mètres; du tombereau pour celles de 100 à 500 mètres; des wagons traînés par des chevaux pour celles de 500 à 2000 mètres, et des wagons remorqués par des locomotives pour des distances de 2000 mètres et au-dessus.

595. *Construction des chaussées.* Tous les déblais et remblais étant effectués, on procède à la construction de la chaussée, ou partie solide de la route. On commence par creuser la forme qu'elle doit occuper, en jetant à la pelle les terres de part et d'autre sur chacun des accotements, comme l'indique la figure 24, planche III. Il est évident que si la route était en remblai, on ménagerait à l'avance cette forme, dont le fond est à peu près incliné comme la surface de la chaussée (581.)

596. *La chaussée étant pavée*, on calcule la profondeur de l'encaissement d'après la hauteur des pavés et l'épaisseur de $0^m,10$ à $0^m,15$ que l'on donne à la couche de sable, sur laquelle on les pose, quelles que

soient leur nature et leur forme, afin de répartir la charge que chaque pavé peut avoir à supporter sur une surface plus grande que sa base.

Les pierres que l'on emploie plus particulièrement comme pavés sont le grès, le granit, le basalte, le porphyre, le schiste, le calcaire et les cailloux roulés (509); à l'exception de ces derniers, que l'on emploie tels qu'on les trouve, pourvu qu'ils aient des dimensions convenables, les pavés faits avec les autres pierres se débitent en cubes dont les dimensions varient de $0^m,16$ à $0^m,25$.

Dans les rues, le pavé s'étend dans toute la largeur qui sépare les maisons ou les trottoirs qui les longent; mais pour les routes, il ne se fait que sur la chaussée, ce qui oblige de le terminer de chaque côté par un rang de pavés plus forts, lesquels, par leur grand empattement, quoique très-faiblement maintenus du côté de l'accotement, ne sont pas renversés par les voitures qui passent de la chaussée sur les accotements.

Aux environs de Paris, les pavés ordinaires ont $0^m,22$ de côté, tandis que ceux des bordures ont $0^m,22 \times 2 = 0^m,44$ de longueur; $0^m,22 \times 1,5 = 0^m,33$ de largeur, et une épaisseur ordinairement un peu moindre que $0^m,33$. Aujourd'hui la largeur se réduit à $0^m,22$, afin que les bordures se relient bien avec les pavés.

Sur la couche de sable de $0^m,15$ environ d'épaisseur étalée sur le fond de l'encaissement qui doit recevoir la chaussée, on place les pavés par rangs perpendiculaires à l'axe de la route, en ayant soin que les joints longitudinaux d'un rang correspondent, autant que possible, au milieu des pavés des rangs voisins. On a la précaution de réunir les pavés de même grandeur et de même dureté.

Avec des pavés cubiques de $0^m,22$ à $0^m,23$ de côté, la quantité de sable employée par mètre carré de chaussée est de $0^{m.c.},15$ pour la forme, $0^{m.c.},03$ pour les joints, et $0^{m.c.},02$ pour couvrir le pavage, afin d'achever de remplir les joints, ce qui fait en tout $0^{m.c.},18$.

Quand, au lieu d'employer des pavés neufs, on fait usage de pavés déjà usés, à la couche de $0^m,15$ de sable on ajoute une épaisseur convenable pour tenir toujours la surface de la chaussée à la même hauteur.

Il ne faut pas que les pavés se touchent; aussi, à cause du bombement assez fréquent de leurs faces, les joints ont-ils de $0^m,020$ à $0^m,025$ d'épaisseur; on prescrit ordinairement de ne leur donner que de $0^m,007$ à $0^m,008$; mais pour atteindre ce but, on serait obligé de les tailler, ce qui est coûteux et ne peut se faire que dans des cas particuliers.

Lorsque deux rues très-fréquentées se croisent, pour que les roues des voitures ne suivent pas les joints des rangs parallèles de pavés, on place ces rangs parallèlement à l'axe du carrefour.

Avant de livrer une rue à la circulation, on affermit chaque pavé dans son alvéole et on l'amène au niveau convenable en le frappant avec une *hie* du poids de 35 à 45 kilog.; c'est seulement après cette

opération que l'on recouvre le pavage de la dernière couche de sable de 0m,02 d'épaisseur.

Dans les rues où il y a un ruisseau au milieu de la chaussée, si l'on plaçait un joint dans l'axe du ruisseau, il serait promptement creusé par les roues des voitures qui tendent naturellement à le suivre. Pour remédier à cet inconvénient, on a imaginé de poser chacun des pavés qui forment le ruisseau de manière qu'un tiers de sa largeur se trouve d'un côté de l'axe du ruisseau et les deux autres tiers de l'autre. Cette disposition, qui réussit à la campagne, ne convient pas dans les villes, où les petits barrages successifs que forment les pavés retiennent les eaux ménagères, lesquelles, en se corrompant, répandent une mauvaise odeur. Il convient, dans ce cas, de former le ruisseau avec des pavés d'une longueur égale à une fois et demie celle d'un pavé ordinaire, et dont la face supérieure est taillée concave et de manière que l'axe se trouve au tiers de sa longueur.

Dans les localités où l'on fait usage de cailloux roulés pour le pavage des rues, on les dispose comme les pavés cubiques, en plaçant le gros bout en bas, afin qu'ils ne s'enfoncent pas sous les charges qu'ils ont à supporter. Afin d'obtenir un pavé plus uni, on place quelquefois le gros bout en haut, mais en inclinant les pavés; malgré cette inclinaison, le pavage est moins solide que par la première disposition.

Les vides étant beaucoup plus grands entre les cailloux roulés qu'entre les pavés cubiques, leur mise en œuvre absorbe un plus grand volume de sable que celle de ces derniers.

On juge de la qualité des pavés :

1° Par la densité; celle des pavés en grès des environs de Paris est de 2.540, au lieu que celle des grès tendres de Fontainebleau n'est que de 2.390;

2° Par la quantité d'eau qu'ils absorbent quand ils sont immergés; les plus durs absorbent 1/569 d'eau, et les plus tendres 1/51;

3° Par le son qu'ils rendent sous le choc du marteau; ce son est d'autant plus sourd qu'ils sont plus tendres ou plus fendillés.

597. *Pour les chaussées en empierrement.* Si le sol est peu résistant, on commence par placer sur tout le fond de l'encaissement de la chaussée une assise de pierres plates, pour servir de fondation et empêcher les petites pierres de pénétrer dans le sol. Sur ces pierres plates, on repose les bases de pierres autant que possible coniques et de 0m,15 à 0m,20 de hauteur, et sur ces dernières on place les pierres concassées, qu'il est bon de répandre par couches que l'on comprime au fur et à mesure avec une hie ou un rouleau en fonte, afin qu'elles s'enchevêtrent bien les unes dans les autres et dans les aspérités des pierres coniques. On peut encore comprimer les couches successives de pierres en faisant passer dessus les voitures de roulage. Il faut avoir soin de refermer les ornières au fur et à mesure qu'elles se forment.

Quand le sol est déjà resistant par lui-même, on se dispense de l'as-

sise de pierres plates; on repose directement sur le sol les bases des pierres coniques, que l'on choisit avec le plus d'empattement possible, et dessus on place les pierres concassées comme dans le premier cas. Au lieu de pierres on emploie quelquefois une couche de sable pour consolider le sol.

Ces chaussées sont maintenues latéralement par deux rangs de bordures en fortes pierres prismatiques, que l'on place de manière que leurs arêtes latérales soient parallèles à l'axe de la route; il convient que ces prismes soient triangulaires, afin que, reposant par une face latérale, ils présentent en haut une arête, laquelle ne produit pas l'effet d'une enclume pour briser les petites pierres sous les roues des voitures, comme le ferait une surface plane; cette dernière circonstance oblige de faire reposer les bordures par une arête, lorsque leur forme est un prisme à base carrée. Ces bordures se maintiennent du côté des accotements par un bourrelet en pierres dont la grosseur diminue depuis le bas jusqu'en haut.

Quand le sol est solide et non sujet à se délayer, toute la chaussée n'est composée que de petites pierres semblables à celles employées pour former la dernière couche dans les cas précédents. Ce mode de construction est souvent employé. C'est surtout dans ce cas qu'il faut avoir soin de comprimer la chaussée avant de la livrer à la circulation; à cet effet on fait usage de rouleaux compresseurs, dont on fait varier à volonté le poids depuis 3000 jusqu'à 9000 kilog., et qui sont quelquefois traînés par 10 ou 12 chevaux.

L'épaisseur des chaussées construites uniquement en petits matériaux varie de 0m,15 à 0m,30, suivant la nature du sol et le poids des voitures; celle des chaussées à un rang de pierres coniques varie de 0m,30 à 0m,35, et celle à deux assises de grosses pierres, de 0m,40 à 0m,45.

Les meilleures pierres employées à la construction des chaussées sont celles qui résistent à la gelée, qui sont anguleuses, afin qu'elles se relient facilement, et qui sont dures, mais non au point de ne pouvoir former les détritus nécessaires à leur liaison; celles qui remplissent le mieux toutes ces conditions sont le muschelkalk, le calcaire dur, le silex anguleux non fragile.

Les petites pierres doivent pouvoir passer dans tous les sens dans un anneau de 0m,06 de diamètre. Elles doivent être purgés de terre; car celle-ci, par les temps de pluie et surtout de gelée et de dégel, se gonfle et désunit les matériaux qui composent la chaussée.

Les pierres concassées fournissent facilement les détritus nécessaires à leur liaison; mais lorsqu'on fait usage de gros gravier, qui ne forme que très-difficilement des détritus, on est obligé d'y mélanger une certaine quantité de sable, ou de briser à l'avance les plus gros galets.

Le volume des vides est les 0,38 du volume total pour le gravier et



les 0,47 pour les pierres concassées; aussi, après le tassement complet, un mètre cube est-il réduit ordinairement à $0^{m.c.},71$. Quelques ingénieurs ont imaginé de remplir les vides au moment de la construction à l'aide de petit gravier et même de détritus.

598. *Chaussée sur un sol compressible ou mouvant.* Lorsqu'une route traverse un sol tourbeux ou vaseux d'une certaine profondeur, il convient de la reposer sur deux assises de fascines se croisant à angle droit, et s'étendant de part et d'autre des remblais, que l'on a soin de choisir les plus légers possibles.

Ces fascines, tout en diminuant les chances d'enfoncement de la route et les affaissements partiels, ont encore l'avantage de la maintenir plus sèche.

Une route construite sur un sol glaiseux est sujette à des changements de forme par suite de son glissement sur la glaise humide. On évite cet inconvénient en construisant des *pierrés*, petits canaux formés de deux petites murettes en pierres sèches, que l'on recouvre d'une large pierre plate. Ces canaux, auxquels on donne de $0^m,10$ à $0^m,20$ de largeur, partent de la forme de la chaussée et viennent aboutir aux fossés en passant sous les accotements. Si la route est en pente, les pierrés partent de la forme et vont aboutir aux fossés par la ligne de plus grande pente. Si la route est horizontale, on dispose longitudinalement la forme en pente et contre-pente, et à chaque point bas on établit un pierré normal à l'axe de la route. Ces pierrés, en maintenant la route sèche, ont l'avantage d'empêcher la glaise de se détremper et par suite de se prêter au glissement (411).

599. *Cassis.* Lorsqu'une route traverse un vallon à fleur du sol, et que ce vallon ne fournit des eaux qu'accidentellement, on fait passer les eaux sur la route, mais en ayant soin de la paver de part et d'autre de la ligne basse, jusqu'au-dessus du niveau que peuvent atteindre les eaux; par cette disposition les eaux ne peuvent pas attaquer la route. Il faut que ce ruisseau transversal, que l'on appelle *cassis*, ait, sur la route, une pente assez grande pour que les eaux n'y laissent pas déposer le limon qu'elles entraînent.

600. *Écharpes.* Nous avons déjà dit qu'afin d'éviter que les eaux pluviales ne suivent les frayés des roues, on donnait à la route une pente transversale; mais cela ne suffit pas dans le cas où la route a une forte pente longitudinale et qu'elle est sujette à être souvent mouillée. Dans ce cas, on force l'eau à s'écouler latéralement en établissant des bourrelets en petits matériaux sur la surface de la route. Ces petites digues, que l'on appelle *écharpes*, ont transversalement une pente très-douce du côté d'aval, afin de ne pas former des obstacles trop difficiles à franchir par les voitures; du côté d'amont, on leur donne une pente d'environ $0^m,05$ en sens contraire de celle de la route.

Longitudinalement, les écharpes partent de l'axe de la route, et elles

sont dirigées suivant la ligne de plus grande pente de la surface de la route. Pour déterminer cette ligne de plus grande pente, on prend sur l'axe de la route le point A, duquel doit partir l'écharpe; on trace une ligne AB dirigée suivant l'axe de la route et une autre AC normale à AB; sur ces lignes on prend deux points qui soient de niveau, c'est-à-dire à une même distance verticale au-dessous du point A; on joint ces deux points par une ligne, qui est horizontale et placée sur la surface de la route; on abaisse du point A une perpendiculaire à cette horizontale, et cette perpendiculaire est la ligne de plus grande pente.

Si la route est bombée, l'écharpe a la forme d'un chevron, et si elle n'a qu'une pente transversale, l'écharpe est tout entière placée dans la même direction, et elle est alors véritablement une écharpe.

601. *Fossés en gradins.* Lorsque les fossés sont construits dans un sol affouillable et qu'ils ont une forte pente, afin de diminuer la vitesse des eaux, on dispose les fossés en gradins, en construisant en pierres sèches des murs de chute pour retenir les terres, et des enrochements au pied de ces murs pour éviter les affouillements.

602. *Entretien des routes pavées.* Cet entretien se fait par *relevés à bout* et par *entretien simple.*

1° *Un relevé à bout* consiste à enlever tous les pavés, pour découvrir complétement une certaine étendue de la forme; à piocher cette forme pour lui rendre son élasticité; à enlever le sable qui est devenu terreux; à rapporter du nouveau sable pour compenser celui rejeté ainsi que l'usure des pavés, afin de replacer la surface du pavage au niveau primitif, et à reconstruire la chaussée comme si elle était neuve, en ayant soin de mettre au rebut tous les pavés de mauvaise qualité, et ceux auxquels l'usure a donné des formes défectueuses ou des dimensions trop faibles.

A Paris, tous les pavés ayant moins de $0^m,16$ d'épaisseur sont rebutés, et ordinairement ce rebut s'élève à 1/8.

A l'origine du relevé à bout on pose deux rangs de pavés neufs, afin de marquer le point où commence le travail; puis on place tous les pavés vieux, en ayant soin de réunir, autant que possible, ceux de mêmes dimensions et de même dureté; on termine ensuite le travail par des pavés neufs. Si le relevé à bout avait une certaine étendue, afin d'éviter le transport des pavés vieux, de distance en distance on placerait quelques rangs de pavés neufs.

A Paris, avec des pavés neufs, un mètre carré de relevé à bout exige $0^{m.c.},02$ de sable pour rafraîchir la forme, $0^{m.c.},03$ pour les joints, et $0^{m.c.},02$ pour couvrir l'ouvrage, ce qui fait en tout $0^{m.c.},07$; avec les pavés vieux, outre ces $0^{m.c.},07$ de sable, il en faut $0^{m.c.},03$ pour compenser l'usure des pavés.

A Paris, les rues très-fréquentées sont relevées à bout à peu près tous les six ans; quelques-unes, établies en mauvais pavés ou sur un sol ar-

gileux, le sont tous les trois ans; on relève les moins passagères tous les vingt ans. Les routes des environs de Paris sont relevées à bout tous les huit à quinze ans.

2° *L'entretien simple* consiste à remplacer seulement çà et là quelques pavés cassés, ou à relever les parties de pavage enfoncées ou usées. Ce travail exige, avant de replacer les pavés, que l'on fasse subir à la forme les mêmes opérations que pour un relevé à bout. La quantité de sable employé est ordinairement de $0^{m.c.}$,08 par mètre carré de surface des pavés remplacés ou remaniés.

603. *Entretien des chaussées en empierrement. Cantonniers.* La nature des matériaux employés dans ce genre de chaussées exige un entretien de tous les instants. Aussi des ouvriers sont ils constamment occupés à empêcher l'eau de séjourner sur la chaussée, à enlever la boue et la poussière à mesure qu'elles se forment, et à prévenir les flaches et les ornières. C'est surtout dans les moments de pluie ou de dégel que ces soins sont indispensables à la conservation de la route.

Les ouvriers occupés à l'entretien des routes sont appelés *cantonniers*, chacun d'eux est seul chargé des travaux d'une certaine étendue de route, que l'on appelle *canton*. Quand, dans les mauvais temps, ils ne suffisent pas pour tous les travaux, on leur adjoint des ouvriers appelés *auxiliaires*.

Tous les trois cantonniers, il y en a un, appelé *cantonnier chef*, chargé de surveiller ses deux voisins et les conseiller dans leurs travaux. Le temps perdu à cette surveillance exige que son canton soit moins étendu que ceux de ses voisins.

Tous ces cantonniers, chefs et ordinaires, sont surveillés par les piqueurs, les conducteurs et les ingénieurs, à des époques non fixées à l'avance, afin que la surveillance soit comme de tous les instants. Des petites lunettes permettent aux surveillants de voir depuis une grande distance, et par conséquent sans être aperçus, si les cantonniers font leur devoir. Les peines infligées aux cantonniers pris en contravention consistent en retenues sur le salaire.

Les cantonniers doivent choisir les temps humides pour rapporter les matériaux sur la route, parce qu'alors ils peuvent enlever facilement la boue, et de plus la surface de la route étant un peu ramollie, sa liaison avec les pierrailles rapportées est plus facile.

Il faut éviter que la boue et la poussière séjournent sur la route, et avoir soin de les enlever avant de replacer des matériaux, surtout si la route repose sur un sol crayeux ou glaiseux, parce que ces détritus pénétraut dans la chaussée, l'eau qui s'y infiltre désunit en se congelant toutes les parties de la chaussée.

Aux termes du règlement auquel sont soumis les cantonniers, ils doivent se pourvoir à leurs frais:

1° D'une brouette;
2° D'une pelle en fer;
3° *Id.* en bois;
4° D'une *houe* ou *tournée*, outil formant pioche d'un côté et pic de l'autre;
5° D'un râcloir en fer;
6° *Id.* en bois;
7° D'un râteau en fer;
8° D'une pince en fer;
9° D'une masse en fer pour casser les pierres ou cailloux;
10° D'un cordeau de 20 mètres.

Les chefs cantonniers doivent être munis, en outre:

1° De trois nivelettes ou voyants;
2° D'un niveau à perpendiculaire gradué, pour indiquer les pentes;
3° D'un double mètre.

L'administration fournit elle-même les balais nécessaires à l'enlèvement des détritus, et elle confie de plus à chacun:

1° Un anneau en fer de 6 centimètres de diamètre, pour faire et vérifier le cassage des matériaux d'entretien;
2° La plaque de cuivre portant en découpure le mot *cantonnier;*
3° Le brassard que les chefs cantonniers portent au bras gauche;
4° Le livret renfermé dans un étui en fer-blanc;
5° Enfin, un jalon de 2 mètres de longueur, divisé en décimètres, ferré par le bas, et garni par le haut d'une plaque en forte tôle, sur chacune des faces de laquelle est indiqué en chiffres très-apparents le numéro du canton. Ce jalon doit toujours être planté sur la route, à moins de 100 mètres de distance de l'endroit où travaille le cantonnier.

PONTS.

604. *Diverses espèces de ponts.* On appelle pont un ouvrage d'art destiné à réunir les deux portions d'une voie de communication interrompue par un cours d'eau, un ravin, ou même par une autre voie située à un niveau inférieur à celui de la première.

Lorsqu'un pont n'est supporté que par deux points d'appui espacés de 4 à 5 mètres au plus, il prend le nom de *ponceau.*

Un pont destiné à faire passer une voie au-dessus d'une autre, ou même d'un vallon dans lequel on ne veut pas la faire descendre, prend le nom de *viaduc.* Cependant ce nom est plus particulièrement réservé aux grands travaux composés d'arches nombreuses et élevées, à l'aide desquels les chemins de fer franchissent les vallées profondes.

Les *ponts-aqueducs* sont ceux qui font passer un cours d'eau au-dessus d'un chemin ou d'une rivière.

Les *ponts-canaux* sont ceux qui supportent un canal de navigation.

Les ponts se divisent encore en *ponts fixes*, ce sont ceux construits à demeure et offrant un passage continu; en *ponts mobiles*, comprenant

ceux qui, en restant dans un point déterminé, permettent d'interrompre momentanément le passage ; en *ponts volants*, ou ponts que l'on peut déplacer à volonté.

Les ponts se construisent en pierre, en bois ou en métal.

Les points d'appui extrêmes d'un pont sont appelés *culées* ; ceux intermédiaires prennent le nom de *piles* quand ils sont en pierre, et de *palées* quand ils sont en bois. Ce qui sépare deux points d'appui prend le nom de travée si on y a fait usage du bois, et celui d'*arche* si on a employé la pierre. Les petites arches prennent le nom d'*arceaux*.

PONCEAUX.

605. *Ponceaux*. On les construit ordinairement sur des ruisseaux dont le volume d'eau est très variable suivant les saisons, et quelquefois même sur des ravins à sec une partie de l'année.

Lorsqu'on a un ponceau à construire, la première chose à déterminer est le *débouché*, c'est-à-dire la distance entre les culées.

Ce débouché doit être suffisant pour débiter les plus grands volumes d'eau qui peuvent se présenter ; s'il était trop étroit, ou le ponceau serait emporté, ou l'eau s'élèverait du côté d'amont, se répandrait sur les terrains environnants, et pourrait couper la route en passant par-dessus.

Quand il existe déjà des ponceaux en amont ou en aval de celui à construire, leurs débouchés servent de terme de comparaison, et en ayant égard à la quantité d'eau qui afflue en plus ou en moins sous ce dernier, on peut fixer approximativement son débouché.

S'il n'y a encore aucun ponceau existant, il faut déterminer le volume de l'eau affluente. Pour cela, si le ravin a une section et une pente à peu près uniformes sur une certaine longueur, et si l'on connaît le niveau des plus hautes eaux, à l'aide de la formule d'Eytelwein ou de celle de M. de Saint-Venant (157), on détermine la vitesse moyenne v en mètres par seconde, et cette vitesse multipliée par la section des eaux donne le volume d'eau affluent par seconde. Ayant ce volume, on fixe le débouché de manière que la vitesse de l'eau sous le pont ne soit pas assez grande pour attaquer le fond (158 et 159).

Quand le niveau des grandes eaux ne sera pas connu, et que la pente et la section du ravin ne seront pas assez régulières pour appliquer les formules du n° 157, on déterminera le débouché par la méthode empirique suivante, qui paraît avoir été sanctionnée par l'expérience pour des pays ou le sol est peu perméable.

Dans les pays plats, comme la Hollande, la largeur du débouché se règle à raison de $0^m,45$ à $0^m,50$ pour chaque 1000 hectares du terrain dont les eaux affluent sous le ponceau. Si le sol est en pente, et que les

plus grandes hauteurs qui environnent le bassin s'élèvent à environ 50 mètres au-dessus du thalweg, la largeur du débouché se prend à raison de $1^{m},25$ par 1000 hectares; il faut encore augmenter ce débouché si le bassin est resserré entre des montagnes très-élevées et très-inclinées, parce que les eaux pluviales arrivent plus vite et en plus grande abondance sous le ponceau.

Si ces moyens de déterminer le débouché paraissaient incertains, on se rendrait compte de la plus grande quantité d'eau qui peut affluer sous le pont en une seconde, en supposant que les plus grands orages sont assez prolongés pour que le volume d'eau qui passe sous le pont en une seconde soit égal à celui qui tombe dans toute l'étendue du bassin dans le même temps, et que, d'après les observations les plus exactes, le maximum d'eau tombé en une seconde est de $0^{m.c.},000002$ par mètre carré. (Des observations faites par M. Mary, en 1843, lui ont donné $0^{m.c.},0000066$ par seconde, pendant une pluie abondante, qui n'était cependant pas un orage).

Les observations faites pendant un grand nombre d'années ayant prouvé que des pluies de cette abondance ne durent jamais plus de 17 heures, il en résulte que, pour appliquer cette méthode, il faut que l'étendue du bassin soit assez faible, et sa pente assez grande, pour qu'en 17 heures la première eau tombée dans les points les plus éloignés du bassin ait eu le temps d'arriver au ponceau.

Dans un très-petit bassin, il peut arriver que le ponceau ait à débiter par seconde la quantité d'eau fournie par un orage ou une trombe d'eau sur le bassin dans ce même temps, diminuée du volume absorbé par le sol.

Les registres de l'observatoire de Paris indiquent que l'orage le plus abondant, parmi ceux observés, a fourni par mètre carré $0^{m.c.},01898$ en 30 minutes, ce qui fait par seconde $0^{m.c.},0000105$. Ces pluies abondantes ne durent pas beaucoup plus que celle-là.

Les cas où il afflue à la fois le plus grand volume d'eau sous le ponceau se présentent quand le sol étant gelé et couvert de neige il survient une pluie chaude, et quand le sol est peu perméable, soit par sa nature, soit par des pavages, soit par des parties couvertes d'édifices, et qu'il survient une pluie abondante.

Sur un sol naturel, il peut y avoir imbibition plus ou moins considérable suivant la formation géologique du terrain supérieur. Sur l'argile plastique, l'argile du gault, les argiles et les marnes argileuses du terrain jurassique, les granits et autres roches non fendillées, l'absorption est à peu près de 0,43 pour 1. Dans les terrains crayeux ou d'autres roches également fendillées, la pluie est presque entièrement absorbée. Lorsque le sol est recouvert de terre végétale sur une très-forte épaisseur, on admet, d'après d'assez nombreuses expériences, que l'eau qui coule à la surface est les 3/7 de l'eau de pluie.

Une fois que l'on a déterminé approximativement le volume des eaux, on se rend compte de la hauteur à laquelle elles s'élèveront dans le ravin à l'aide de la formule d'Eytelwein ou de celle de M. de Saint-Venant; la première est (157)

$$\frac{S}{P} I = 0{,}000024 \frac{Q}{S} + 0{,}000365 \frac{Q^2}{S^2}.$$

Il y a dans cette équation deux inconnues, la section S et le périmètre P, desquelles dépend la profondeur de l'eau.

Si la section S était un rectangle, on pourrait remplacer S et P en fonction de la profondeur, qui resterait seule comme inconnue dans l'équation précédente, et serait facilement déterminée.

Si la section S était un trapèze, on pourrait encore suivre une même marche; mais les valeurs de S et P en fonction de la profondeur seraient déjà compliquées, et ces valeurs substituées dans la formule précédente la rendraient difficile à résoudre. Il vaut mieux dans ce dernier cas suivre la marche adoptée pour une forme quelconque de section. Cette marche consiste à rapporter sur une feuille de papier le profil en travers du ravin, à assigner à la profondeur de l'eau une valeur que l'on préjuge convenable, à calculer la valeur de S qui correspond à cette profondeur, ce qui se fait en la décomposant en trapèzes et en triangles par des lignes verticales; on évalue également P, et les valeurs de S et P substituées dans l'équation précédente donnent pour Q la valeur que l'on a déterminée, si la valeur assignée à la profondeur est convenable; cela n'étant pas, on essaye une seconde profondeur puis une troisième, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive à une valeur satisfaisante.

Ayant la profondeur de l'eau dans le ravin et le volume d'eau à débiter, on prend le débouché tel que sa largeur multipliée par la profondeur d'eau trouvée donne une section capable de débiter le volume Q, sans que la vitesse soit trop considérable.

Les ingénieurs qui auront à déterminer le débouché à donner à un pont consulteront avec avantage les considérations que donne M. Dupuit dans son ouvrage (160).

Les ponceaux se font ordinairement en maçonnerie et quelquefois en bois. Dans ce dernier cas, les culées peuvent se faire avec des pieux; mais le bois qui les forme étant à l'air d'un côté et en contact avec la terre de l'autre, il se trouve dans un état de sécheresse et d'humidité variable qui le fait pourrir promptement.

Les voûtes des ponceaux se font en arc de cercle quand l'élévation des eaux ne permet pas de les construire en plein cintre.

Il arrive quelquefois que l'ouverture que l'on est obligé de donner à un ponceau est assez faible pour que l'eau y prenne une vitesse suffisante pour affouiller le sol. On évite cet affouillement en recouvrant

le sol avec un *radier* en maçonnerie, que l'on prolonge, si cela est nécessaire, dans toute l'étendue du rétrécissement occasionné par le ponceau.

PONTS EN PIERRE.

606. *Ponts en pierre.* Les ponts en charpente nécessitant des réparations coûteuses et de nature à intercepter trop souvent le passage, pour une voie très-fréquentée, sur laquelle les communications sont importantes, on a recours à la pierre et quelquefois à la fonte ou au fer.

Dans l'étude d'un projet de pont, on a à considérer : 1° l'emplacement du pont; 2° son débouché; 3° la grandeur de ses arches; 4° leur forme; 5° les dimensions de leurs différentes parties; 6° le mode de construction.

607. *Emplacement d'un pont.* Il est ordinairement déterminé par la position des deux voies que le pont doit mettre en communication. Cependant il peut arriver que le pont étant placé dans la direction d'une voie, il soit oblique par rapport à l'autre, ou que le niveau auquel se trouvent les voies exigerait de fortes rampes pour arriver au niveau auquel on est obligé d'élever le pont, ce qui enterrerait les maisons. Il peut arriver aussi que le sol où on aurait à construire conduirait à des dépenses considérables, ou encore que la direction des piles y serait oblique par rapport à celle du courant, ce qu'il faut éviter autant que possible, surtout pour un grand pont, parce qu'un pont biais, outre qu'il est plus difficile à appareiller, est aussi plus sujet aux affouillements. Dans ces divers cas, on doit rechercher si dans le voisinage il n'y aurait pas un point plus favorable sous le rapport de la commodité, de la solidité et de l'économie.

La largeur d'un pont dépend du nombre des personnes et des voitures qui circulent ou peuvent circuler dans les rues ou sur les routes qu'il doit réunir. Dans une ville, la largeur doit en général être au moins égale à celle des rues qui y aboutissent. A la campagne, cette largeur doit ordinairement permettre, surtout si le pont est un peu grand, à deux voitures de se croiser; cela oblige de la porter à 5 mètres; on lui donne ordinairement 7 à 8 mètres si le pont est long, et on fait un trottoir de chaque côté pour les piétons.

608. *Débouché.* Sur une rivière considérable, la détermination du débouché est de la plus haute importance. Dans un ponceau, un radier permet de rétrécir le débouché au point d'obtenir une vitesse qui entraînerait le sol naturel (605); mais dans un grand pont, sauf des cas exceptionnels, il faut renoncer au radier, et calculer le débouché tel qu'il puisse débiter les eaux sans que leur vitesse atteigne la limite à

laquelle elles attaqueraient le fond (158), produiraient des affouillements, déracineraient les points d'appui et amèneraient la chute du pont.

Il faut aussi éviter que le débouché du pont soit trop grand, parce qu'il pourrait se former des atterrissements en quelques points de sa longueur, lesquels, en se consolidant par les herbages qui y pousseraient, pourraient faire prendre au courant une direction oblique, et une grande crue survenant, le pont pourrait être détruit par suite de l'affouillement de quelques piles; c'est ce qui est arrivé à Roanne et à Nevers. Cependant, le cas de destruction par suite d'un débouché trop grand étant beaucoup plus rare que celui provenant d'un débouché trop faible, il y a moins de danger de pécher dans le premier sens que dans le second.

Pour arriver à fixer convenablement le débouché, il faut jauger le cours d'eau avec soin, d'après ce qui a été dit nos 157, 158 et 159, pendant les basses, les grandes et les moyennes eaux, en déterminant directement la vitesse au moyen de flotteurs, quand la saison et le temps le permettent, ou au moyen des formules dans le cas contraire (605). Du jaugeage pendant les basses eaux on conclut un débouché qui ne permet pas les atterrissements, de celui fait pour les grandes crues on s'assure que le débouché peut débiter toutes les eaux sans que la vitesse soit trop grande, et le jaugeage pendant les eaux moyennes donne la direction du régime ordinaire des eaux.

Ayant dans chacun de ces cas le niveau des eaux pour chaque débouché ou espace libre entre les piles et culées, on a la section des eaux, et le volume divisé par cette section donne la vitesse moyenne, qui ne doit pas permettre les atterrissements, ni pouvoir corroder le sol.

Il est évident que si la rivière débordait au point où l'on doit construire, son jaugeage ne pourrait s'effectuer en cet endroit pendant les grandes eaux; on le ferait alors en un point situé à une certaine distance en amont ou en aval, où la rivière serait parfaitement encaissée.

Lorsque les eaux s'élèvent au-dessus du niveau des naissances des voûtes, il faut avoir égard à ce que le débouché ne croît plus en raison de la hauteur des ouvertures, et pour cela augmenter en conséquence l'écartement des appuis. On augmente aussi cette distance pour avoir égard à la contraction de l'eau dans les ouvertures du pont (609).

609. ***Remou.*** Par suite du rétrécissement de la rivière, causé par les piles, le niveau de l'eau s'élève d'une certaine quantité en amont du pont. Il est important de déterminer cet exhaussement, appelé *remou*, afin de s'assurer qu'il ne causera pas de dommages aux propriétés riveraines.

Appelons :

L	la largeur de la rivière en avant du pont;
l	la largeur totale des piles;
x	le remou;
h	la profondeur moyenne de la rivière en amont du remou; la profondeur est sensiblement la même entre les piles du pont;
$h+x$	la profondeur de l'eau au devant des piles;
k	le coefficient de contraction qui résulte du passage de l'eau entre les piles; Eytelwein fait $k=0.85$ pour les avant-bas coupés carrément, et $k=0.95$ pour ceux terminés en angle aigu; on fait $k=0.90$ pour la forme usitée aujourd'hui (137);
v	la vitesse en amont du remou;
v'	la vitesse de l'eau au point du plus grand exhaussement du niveau de l'eau;
v''	la vitesse de l'eau entre les piles, ou mieux au point de plus grande contraction;
Q	le débit de la rivière par seconde.

Le débit Q étant le même au point où il n'y a ni remou ni rétrécissement qu'aux points où ces effets se produisent, on a à la fois

$$Q = Lhv = L(h+x)\,v' = (L-l)\,hv''k.$$

Des deux premières valeurs de Q on conclut

$$v' = \frac{Lhv}{L(h+x)} = \frac{hv}{h+x},$$

et de la première et de la troisième on tire

$$v'' = \frac{L\,v}{(L-l)k}.$$

Le remou doit être égal à la différence des hauteurs génératrices des vitesses v' et v''; on a donc

$$x = \frac{v''^2 - v'^2}{2g}. \qquad (131)$$

Remplaçant dans cette équation v' et v'' par leurs valeurs précédentes, on a

$$x = \frac{v^2}{2g}\left(\frac{L^2}{(L-l)^2k^2} - \frac{h^2}{(h+x)^2}\right).$$

Équation du troisième degré qui ne contient que la seule inconnue x, et qu'il convient de résoudre par tâtonnement; ainsi on assignera à x, dans le second membre de l'équation, une valeur que l'on préjugera convenable; l'équation, qui sera alors du premier degré, donnera pour x une seconde valeur plus exacte que celle supposée; cette deuxième valeur substituée dans le second nombre de l'équation en fournira une troisième que l'on pourra considérer comme satisfaisant exactement à

l'équation, et qu'en pratique on pourra adopter comme étant la hauteur du remou.

Si l'on a, comme dans une expérience faite sur le Veser, et rapportée par M. D'Aubuisson, $L = 180^m,71$, $l = 84^m,58$, $h = 5^m,37$ et $v = 1^m,494$; supposant $k = 0,90$, et faisant $x = 0^m,25$, par exemple, dans le second membre de l'équation précédente, on a

$$x = \frac{1,494^2}{19,62}\left(\frac{180,71^2}{(180,71 - 84,58)^2 \times 0,9^2} - \frac{5,37^2}{(5,37 + 0,25)^2}\right) = 0^m,393.$$

Cette valeur substituée dans le second membre de l'équation donnerait $x = 0^m,398$, valeur que l'on peut considérer comme satisfaisant exactement à l'équation, et qui ne diffère pas sensiblement de celle $0^m,382$ qu'a donnée l'expérience. (On pourra consulter avec fruit, pour cette question de remou, le travail de M. Belanger : *Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement des eaux courantes*, et l'ouvrage de M. Dupuit) (160).

610. *Grandeur des arches.* Sur une rivière qui n'est ni navigable ni exposée à des crues ou à des débâcles, on adopte de petites arches, qui, à longueur égale de pont, sont moins coûteuses que les grandes, quand toutefois la nature du sol ne conduit pas à de plus fortes dépenses par suite du plus grand nombre de piles à fonder.

Quand la rivière, sans être navigable, est sujette à des crues et à des débâcles, on doit adopter des arches assez grandes pour que les glaces ou tout autre corps flottant ne soient pas arrêtées par les piles; il en résulterait des amas de glaces, appelés *embâcles*, qui sont une des causes les plus fréquentes de la destruction des ponts. Il ne faut pas en général adopter des arches moindres que celles du premier pont placé en amont.

Sur une rivière navigable, il faut proportionner les arches aux dimensions des bateaux, et surtout à la vitesse du courant. Si cette vitesse est grande, le débouché ayant moins de 25 mètres, on ne fait qu'une seule arche. Pour un plus grand débouché, afin d'éviter les dépenses considérables occasionnées par les grandes arches, on en fait de plus petites. Le nombre des arches doit être de trois au moins, sauf à faire l'arche du milieu plus grande que les autres, si elle était insuffisante pour la navigation.

Quand la rivière navigable a une faible pente, la largeur des arches peut être moindre, et on peut même adopter un nombre pair d'arches, c'est-à-dire placer une pile au milieu, si cette disposition offre des avantages d'exécution compensant ses inconvénients.

611. *Forme des arches.* La surface intérieure des voûtes est engendrée par une droite qui se meut en restant horizontale et en s'appuyant sur une demi-circonférence dont le diamètre est égal à l'ouverture de

l'arche, ce qui donne une voûte en *plein cintre;* ou sur une ellipse ou une courbe à plusieurs centres, dont les extrémités sont, comme dans le cas précédent, tangentes aux pieds-droits, ce qui fournit une voûte en *anse de panier;* ou encore sur un seul arc de cercle rencontrant les pieds-droits suivant un certain angle, et on a alors une voûte en *arc de cercle.*

Les voûtes en plein cintre étant les plus faciles à appareiller et les plus solides, on les construit toutes les fois qu'elles laissent un passage suffisant à l'eau et aux bateaux jusqu'au moment où la rivière cesse d'être navigable, sans porter le pont à une hauteur que ne permettent pas ses abords. Quand ces conditions ne peuvent être convenablement remplies par les voûtes en plein cintre, on fait usage de voûtes en anse de panier, et si celles-ci ne laissent pas encore un débouché convenable, on a recours aux voûtes en arc de cercle.

Les *naissances* d'une voûte sont les points où elle se raccorde avec les pieds-droits. La *montée* ou la *flèche* est la hauteur verticale de la clef au-dessus des naissances. Dans les voûtes en arc de cercle, il faut tenir les naissances au-dessus du niveau auquel atteignent les débâcles, pour qu'elles ne soient pas dégradées par les glaces et qu'elles ne rétrécissent pas le débouché. Il est difficile de satisfaire complétement à cette condition dans les voûtes en plein cintre et en anse de panier; du reste, pour une certaine élévation de niveau, au-dessus des naissances, le débouché est moins rétréci par ces voûtes que par celles en arc de cercle. Pour remédier jusqu'à un certain point à l'effet de ce rétrécissement, on a imaginé aux ponts de Neuilly, Bordeaux, etc., d'évaser la voûte sur les plans de tête, de manière à surhausser les naissances dans ces plans jusqu'au niveau des plus hautes eaux, tout en laissant la clef à la même hauteur que dans la partie cylindrique de la voûte. Dans son mouvement, la génératrice de chacune de ces parties évasées passe successivement dans tous les plans normaux à la partie cylindrique de la voûte.

612. *Tracé des arches.* Les tracés des voûtes en plein cintre et en arc de cercle n'offrent aucune difficulté. Dans ces dernières, si l'on désigne par m la montée, par l la demi-ouverture du pont, et par r le rayon de l'arc, on a

$$r = \frac{l^2 + m^2}{2m}.$$

Il ne faut prendre, dans aucun cas, la montée de moins du 1/8 de l'ouverture. Cependant le *pont aux Doubles* et le *petit Pont*, à Paris, établis en meulière hourdée avec du ciment de Vassy, sont surbaissés au 1/10.

Le tracé de l'anse de panier, dont la forme se rapproche de celle de l'ellipse (*Int.*, 869), est un peu plus difficultueux que les précédents. Les arcs, en nombre impair, dont il se compose doivent se raccorder tan-

gentiellement à leurs extrémités, afin d'éviter les jarrets, et de plus être décrits avec des rayons convenablement proportionnés, afin que leur ensemble forme une courbe bien continue ne paraissant pas s'infléchir aux points de contact des arcs. Pour que ces conditions soient le plus convenablement remplies, les centres de deux arcs successifs doivent se trouver sur le même rayon passant par le point de contact des deux arcs, et les rayons aboutissant à ces points de contact doivent faire des angles égaux entre eux, et égaux au quotient de deux angles droits ou de 180° par le nombre des arcs qui composent la courbe; ainsi, lorsque l'anse de panier est à 3, 5, 7, etc., centres, les divers rayons font respectivement entre eux des angles de 60°, 36°, 25°,714, et de plus les rayons doivent, d'après la méthode de M. Michal, ingénieur en chef directeur des ponts et chaussées, être égaux au rayon de courbure de l'ellipse qui a les mêmes axes que l'anse de panier.

C'est d'après ces hypothèses que M. Michal a calculé le tableau suivant, qui donne pour diverses montées les valeurs des rayons nécessaires pour effectuer le tracé; ces valeurs sont données en prenant l'ouverture pour unité.

ANSES A 5 CENTRES.		ANSES A 7 CENTRES.			ANSES A 9 CENTRES.			
Montée.	1er rayon	Montée.	1er rayon.	2e rayon.	Montée.	1er rayon.	2e rayon.	3e rayon.
0.36	0.278	0.33	0.228	0.315	0.25	0.130	0.171	0.299
0.35	0.265	0.32	0.216	0.302	0.24	0.120	0.159	0.278
0.34	0.252	0.31	0.203	0.289	0.23	0.111	0.148	0.268
0.33	0.239	0.30	0.192	0.276	0.22	0.102	0.138	0.252
0.32	0.225	0.29	0.180	0.263	0.21	0.093	0.126	0.237
0.31	0.212	0.28	0.168	0.249	0.20	0.083	0.114	0.222
0.30	0.198	0.27	0.156	0.236				
		0.26	0.145	0.223				
		0.25	0.133	0.210				

Soit, fig. 25, pl. III, aa' l'ouverture, et cd la montée. Quand aa' est moindre que $3cd$, on emploie l'anse de panier à 3 centres. Pour la tracer, sur aa' comme diamètre, on décrit une demi-circonférence, que l'on divise en trois parties égales par les rayons ce et ce'; on mène les cordes ae, ef, fe' et $e'a'$; par le point d on conduit dh parallèle à fe et dh' parallèle à fe', et les lignes hi et $h'i$, menées respectivement parallèles à ce et ce', déterminent les trois centres k, i et k', et par suite les rayons $ak = a'k'$ et hi de l'anse de panier $ahh'a'$. D'abord les centres de deux arcs consécutifs sont bien placés sur le même rayon aboutissant au point de raccordement des arcs. De plus, deux rayons consécutifs font entre eux un angle de $\frac{180}{3} = 60°$; car on a

akh = *ace*, *hih'* = *ece'* et *h'k'a'* = *e'ca'*.

Pour tracer une anse de panier à 5 centres, on suit la même marche. Ainsi, après avoir, fig. 26, pl. III, mené les rayons *cd*, *ce*, *ce'* et *cd'*, divisant la circonférence *aba'* en 5 parties égales, et les cordes *ad*, *de*, *eb*, etc., on prend le premier rayon *af* égal à la valeur consignée au tableau précédent, et on mène *gh* parallèle à *cd*. Conduisant ensuite *hi* parallèle à *de* et *li* parallèle à *be*, puis *ik* parallèle à *ce*, on obtient le deuxième centre *g* et le troisième *k*. Le tracé est le même de l'autre côté de *cl*; mais on peut pour ce côté commencer par le rayon *ki'*, le point *k* étant connu.

Pour une anse de panier à 7 centres, on opérerait d'une manière semblable. Ainsi on prendrait *af* égal au premier rayon du tableau, on mènerait *hg* parallèle au premier rayon diviseur *cd*; on prendrait ensuite *hg* égal au deuxième rayon consigné au tableau, on mènerait par *g* une parallèle au deuxième rayon diviseur, et les troisième et quatrième centres se détermineraient de la même manière que les deuxième et troisième *g* et *k* dans le cas précédent. On opérerait d'une manière tout à fait semblable pour une anse de panier à 9 centres, et en général pour un nombre impair quelconque de centres.

M. Lerouge, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a, pour tracer les anses de panier, toujours supposé que les divers rayons passant par les points de raccordement feraient des angles égaux entre eux, mais que les rayons croîtraient suivant une progression arithmétique. C'est d'après cette hypothèse qu'il a calculé les résultats du tableau suivant, qui supposent l'ouverture prise pour unité. Ce tableau contient en outre la hauteur réduite du débouché enveloppé par la courbe, l'ouverture étant également prise pour unité.

ANSES A 3 CENTRES.				ANSES A 5 CENTRES.				ANSES A 7 CENTRES.				ANSES A 9 CENTRES.			
Montée.	Premier rayon.	Différ. des rayons successifs.	Hauteur réduite.	Montée.	Premier rayon.	Différ. des rayons successifs.	Hauteur réduite.	Montée.	Premier rayon.	Différ. des rayons successifs.	Hauteur réduite.	Montée.	Premier rayon.	Différ. des rayons successifs.	Hauteur réduite.
0.380	0.336	0.327	0.303	0.350	0.245	0.228	0.274	0.330	0.183	0.181	0.256	0.320	0.148	0.148	0.240
0.390	0.350	0.301	0.310	0.360	0.262	0.213	0.282	0.340	0.202	0.171	0.264	0.330	0.167	0.140	0.255
0.400	0.363	0.273	0.318	0.370	0.279	0.108	0.290	0.350	0.221	0.160	0.272	0.340	0.187	0.132	0.263
0.410	0.377	0.240	0.326	0.380	0.290	0.183	0.298	0.300	0.230	0.149	0.281	0.350	0.200	0.123	0.272
0.420	0.301	0.219	0.334	0.300	0.313	0.107	0.300	0.370	0.258	0.139	0.289	0.300	0.220	0.115	0.280
0.430	0.404	0.191	0.341	0.400	0.330	0.152	0.315	0.380	0.270	0.128	0.207	0.370	0.245	0.107	0.288
0.440	0.818	0.104	0.349	0.410	0.347	0.137	0.323	0.300	0.295	0.117	0.305	0.380	0.265	0.009	0.297
0.450	0.432	0.137	0.350	0.420	0.304	0.122	0.330	0.400	0.314	0.107	0.313	0.390	0.285	0.091	0.305
0.400	0.445	0.100	0.364	0.430	0.381	0.107	0.338	0.410	0.332	0.000	0.322	0.400	0.304	0.082	0.313
0.470	0.450	0.082	0.371	0.440	0.398	0.001	0.340	0.420	0.351	0.085	0.330	0.410	0.324	0.074	0.321
0.480	0.473	0.055	0.378	0.450	0.410	0.077	0.354	0.430	0.370	0.075	0.338	0.420	0.343	0.000	0.329
0.490	0.486	0.027	0.380	0.400	0.432	0.061	0.302	0.440	0.388	0.064	0.346	0.430	0.363	0.058	0.337
0.500	0.500	0.000	0.393	0.470	0.449	0.040	0.370	0.450	0.407	0.053	0.354	0.440	0.383	0.049	0.345
				0.480	0.466	0.030	0.377	0.400	0.425	0.043	0.301	0.450	0.402	0.041	0.353
				0.400	0.483	0.015	0.385	0.470	0.444	0.032	0.309	0.460	0.422	0.038	0.301
				0.500	0.500	0.000	0.393	0.480	0.403	0.021	0.377	0.470	0.441	0.025	0.369
								0.490	0.481	0.011	0.385	0.480	0.461	0.016	0.377
								0.500	0.500	0.000	0.303	0.490	0.480	0.008	0.385
												0.500	0.500	0.000	0.303

Ajoutant la différence des rayons successifs au premier rayon, on a le deuxième; cette différence ajoutée au deuxième rayon donne le troisième, et ainsi de suite. A l'aide de ces divers rayons, on fera le tracé comme il a été indiqué plus haut.

Au pont de Neuilly, on a employé une anse de panier à 11 centres, que l'on a tracée comme l'indique la fig. 27, pl. III.

On prend un point k, que l'on croit devoir être le premier centre, et on divise fk de manière que $kj = \frac{ji}{2} = \frac{ih}{3} = \frac{hg}{4} = \frac{gf}{5}$. Cela fait, on prend $fa = 3fk$; on divise fa en 5 parties égales, aux points e, d, c, b; on joint ek, dj, ci, bh et ag, et si le point k a été bien choisi, la courbe ayant pour centres successifs les points k, r, o, m, n, a, passera par le sommet q de la montée. On conçoit que ce n'est que par tâtonnement que l'on arrivera à la position convenable du point k. Supposons que l'on a fait une première hypothèse, et que le point k choisi ne convienne pas; on aura la valeur convenable x, de fk, à l'aide de la formule

$$x = \frac{m(a-b)}{4m-s}.$$

$a = fl$ demi-ouverture;
$b = fq$ montée;
m valeur qu'on a prise pour fk dans la première hypothèse;
s développement de la ligne brisée $anmork$ qu'a donnée la première hypothèse.

613. *Formes des piles. Fondations.* Ce qui a été exposé au n° 550 comprend comme cas particulier la fondation des ponts.

La coupe horizontale des piles proprement dites est un rectangle; mais on les termine en amont et en aval par un massif de maçonnerie faisant saillie sur les têtes du pont; le massif d'amont s'appelle *avant-bec*, et celui d'aval *arrière-bec*. Ces becs s'élèvent jusqu'au-dessus des plus hautes eaux, afin qu'ils préservent complétement le massif de la pile du choc des corps flottants; ainsi, dans les ponts en plein cintre et en anse de panier, ils peuvent s'élever au-dessus des naissances; dans les ponts en arc de cercle on les termine aux naissances, les eaux ne s'élevant pas plus haut. On les surmonte de demi-cônes qui les raccordent avec les *tympans* du pont.

Le fruit des piles ne doit pas être supérieur à 1/20 ou 1/15.

Les becs ne sont pas seulement destinés à préserver les massifs des piles du choc des corps flottants, mais aussi à faciliter, par leur forme, le passage de l'eau, de manière à diminuer la contraction et les tourbillonnements de l'eau et par suite les affouillements (609). Il est évident que les formes qui doivent le mieux satisfaire à ces conditions sont celles qu'il convient de donner aux proues et poupes verticales, pour faciliter le mouvement des bateaux (369). Par des expériences directes sur des piles

de $0^m,15$ d'épaisseur et de diverses formes, le canal ayant $0^m,50$ de largeur, l'eau y circulant sur une épaisseur de $0^m,04$, avec une vitesse de $3^m,90$ par seconde, Gauthey a reconnu que la forme rectangulaire était la plus défavorable, que la forme d'un triangle rectangle favorisait peut-être encore plus les affouillements, que celle en demi-cercle était un peu plus préférable, que le triangle équilatéral l'était davantage, et qu'une forme, plus convenable encore que cette dernière, était celle composée de deux arcs de cercle tangents aux faces de la pile et ayant leurs centres respectivement sur ces faces.

Dans des expériences sur l'avant-bec formé de deux arcs de cercle, on a fait descendre les naissances au-dessous du niveau de l'eau; alors le remou a été considérable, et les courants ont divergé à peu près autant que dans les expériences faites avec les avant-becs rectangulaires.

Ces expériences conduisent à adopter la forme triangulaire équilatérale, ou mieux la forme en arcs de cercle; mais les angles aigus qu'elles présentent aux chocs des glaces et des autres corps flottants sont promptement endommagés; aussi donne-t-on en général la préférence aux avant-becs demi-circulaires.

Une forme elliptique concilierait en partie les avantages de la forme circulaire et de celle en arcs de cercle.

614. *Appareil des voûtes.* Les voussoirs sont en nombre impair, et celui qui forme clef doit se trouver au milieu; leurs plans de joints sont normaux à la surface cylindrique de la voûte, et on ne les raccordait avec la maçonnerie qui les surmonte que par des faces horizontales et verticales, mais dans les ponts que l'on construit aujourd'hui, la courbe d'extrados est le plus généralement continue comme celle d'intrados. Les dimensions des voussoirs dépendent de celles des pierres que l'on a à sa disposition; cependant il ne faut pas que leur longueur soit trop grande par rapport à leur épaisseur, parce qu'ils se rompraient; il faudrait dans ce cas les composer de plusieurs morceaux. Au pont de Neuilly, les voussoirs, qui sont les plus longs que l'on ait employés, ont $1^m,80$ de longueur sur $0^m,46$ d'épaisseur à la *douelle*, c'est-à-dire à la surface intérieure de la voûte (549).

615. *Dimensions des voûtes. Joints de rupture.* Lorsque les dimensions d'une voûte et de ses culées sont réduites au point de ne pouvoir se soutenir, on remarque, au moment où l'équilibre va se rompre, qu'en général la voûte s'ouvre, comme l'indique la fig. 28, pl. III, à l'intrados à la clef, à l'extrados en des points placés dans les *reins* de la voûte, et que les pieds-droits tournent autour de l'arête extérieure de leur base.

Quelquefois, à la rupture, on remarque que la voûte se fend à la clef et dans les reins, mais sans s'ouvrir, et que les pieds-droits glissent sur leur base.

Il est encore un troisième cas possible, c'est celui où le voussoir in-

férieur, c'est-à-dire l'ensemble du pied-droit et de la partie de voûte inférieure au rein, exerce, pour tomber en avant, un effort plus grand que celui produit par le voussoir supérieur pour le faire tourner en sens contraire. Alors la voûte s'ouvre comme dans le premier cas, mais à l'extrados à la clef, à l'intrados aux reins, et les pieds-droits tournent autour de l'arête intérieure de leur base (fig. 29, pl. III).

Une voûte peut être considérée comme composée de 4 voussoirs séparés par les joints où la rupture est possible, et qui doivent mutuellement se maintenir en équilibre.

1° Examinons d'abord le *premier cas*, celui où il y a affaissement de la voûte et renversement des pieds-droits, fig. 28, pl. III. Au moment où l'équilibre se rompt, on peut supposer théoriquement que les voussoirs ne reposent plus entre eux et sur le sol que par des arêtes a, b, b', c et c'; alors ab, bc, ab' et $b'c'$ sont entre eux dans le même état d'équilibre que des droites rigides ab, bc, ab' et $b'c'$, dont les poids sont ceux des voussoirs, et dont les centres de gravité sont placés aux points G', g', etc., situés sur les verticales passant par les centres de gravité G, g, etc., des voussoirs. (*Int.*, 1095 et suiv.)

Il convient, pour abréger les calculs relatifs à la poussée des voûtes, de ne considérer qu'une tranche de voûte de 1 mètre de longueur; s'il y a équilibre sur 1 mètre, il est évident que l'équilibre subsistera sur toute l'étendue de la voûte.

Représentons : ad par x, de par x', ef par y, fc par y', bh par z et ci par z'.
Soit P le poids du voussoir ab et Q celui du voussoir bc.

Le poids P, que l'on peut supposer appliqué en G' ou même en h, se décompose en deux forces verticales, l'une $P\frac{z}{x}$ appliquée en a, et l'autre $P\frac{x-z}{x}$ appliquée en b. Le poids Q, que l'on peut supposer appliqué en g' ou même en i, se décompose également en deux forces verticales, l'une $Q\frac{z'}{x'}$ appliquée en b, et l'autre $Q\frac{x'-z'}{x'}$ appliquée en c. Les voussoirs ab' et $b'c'$ fournissent les mêmes composantes, appliquées respectivement aux points a, b' et c'.

Ainsi au point a agit une force verticale $2P\frac{z}{x}$, laquelle se décompose en deux forces égales, dirigées l'une suivant ab et l'autre suivant ab'. Représentant par C chacune de ces composantes, on a

$$C : 2P\frac{z}{x} :: ab = \sqrt{x^2+y^2} : 2y, \text{ d'où } C = P\frac{z\sqrt{x^2+y^2}}{xy}.$$

La force C, agissant suivant ab, peut être supposée appliquée au point b, où elle se décompose en deux autres :

L'une verticale et égale à $P\frac{z}{x}$;

L'autre horizontale et égale à $P\frac{z\sqrt{y^2+x^2}}{xy} \times \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} = P\frac{z}{y}$.

Considérant alors le voussoir *bc*, on voit qu'il est sollicité par la force horizontale $P\frac{z}{y}$ appliquée au point *b*, et par les forces verticales Q, $P\frac{x-z}{x}$ et $P\frac{z}{x}$ appliquées, la première au point *g* et les dernières au point *b;* par conséquent, pour que ce voussoir ait de la stabilité, on doit avoir

$$Qz' + \left(P\frac{x-z}{x} + P\frac{z}{x}\right)x' - P\frac{z}{y}y' > 0,$$

ou en simplifiant,

$$Qz' + Px' - P\frac{zy'}{y} > 0. \qquad (a)$$

Ajoutant $Pz - Pz$ au premier membre de cette inégalité, on a

$$Qz' + P(x'+z) - \left(Pz + P\frac{zy'}{y}\right) > 0.$$

Qz' est le moment du voussoir *bc*, pris par rapport au point *c*, $P(x'+z)$ est le moment du voussoir *ab*, pris par rapport au même point; par conséquent la somme de ces deux expressions est égale au moment total MA de la demi-voûte, pris par rapport au point *c*. (*Int.*, 1040 et suivants.)

$M = Q + P$ poids de la demi-voûte;
A distance horizontale du centre de gravité de la demi-voûte au point *c*.

Le dernier terme du premier membre de l'inégalité précédente devient, en réduisant au même dénominateur,

$$Pz\frac{y+y'}{y} = PH\frac{z}{y}.$$

$H = y + y'$ hauteur totale de la voûte.

L'inégalité précédente devient donc en définitive

$$MA - PH\frac{z}{y}, \text{ ou } H\left(\frac{MA}{H} - P\frac{z}{y}\right) > 0.$$

Ainsi il y aura rupture quand le terme négatif sera plus grand que le terme positif, équilibre quand il lui sera égal, et on obtiendra une stabilité d'autant plus grande qu'il deviendra plus petit relativement à ce terme positif.

Le terme $\frac{MA}{H}$ étant constant, et celui $\frac{Pz}{y}$ étant seul variable, il est évident que si une voûte doit se rompre, ce sera au point pour lequel $P\frac{z}{y}$ est maximum; ainsi la première chose à faire pour s'assurer qu'une

voûte projetée résistera, c'est de déterminer la position du joint qui donne $P\frac{z}{y}$ maximum.

Il convient de remarquer que dans cette recherche on n'a à considérer que le voussoir supérieur, et que les joints pour lesquels on doit calculer les valeurs correspondantes de P, y et z doivent être choisis voisins du joint qu'à l'œil on suppose devoir être celui de rupture. Il convient aussi, pour abréger les calculs, d'observer que les valeurs de P étant proportionnelles aux surfaces correspondantes de la section de la voûte, et que les valeurs de z et de y données par ces surfaces étant les mêmes que celles des portions correspondantes de la voûte, on peut opérer sur ces surfaces pour déterminer les valeurs successives de y et z, et que la position du joint de rupture sera déterminée par la valeur maximum du produit de $\frac{z}{y}$ par la surface correspondante.

Si on arrivait à une valeur de $P\frac{z}{y}$ trop grande, on augmenterait la largeur des pieds-droits de manière à faire croître convenablement MA.

Ce qui vient d'être dit s'applique aux voûtes surbaissées comme à celles en plein cintre.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la voûte n'avait à supporter que son propre poids; mais ordinairement elle est surmontée d'un massif de maçonnerie formant une surface horizontale au-dessus de la voûte et des pieds-droits; de plus encore, ce massif supporte ordinairement une surcharge accidentelle ou permanente.

Dans ces divers cas, les poids P, Q et M comprennent non-seulement ceux des parties correspondantes de la voûte proprement dite, mais aussi ceux des massifs de maçonnerie et les portions de surcharge qui reposent sur ces parties de la voûte. On a également égard à ces poids additionnels en déterminant les positions des centres de gravité.

Il convient de faire l'épure qui sert à déterminer le joint de rupture à une grande échelle; cela aide à fixer la position des centres de gravité, et à calculer les surfaces et par suite les poids des diverses parties de voûte que l'on a à considérer.

2° *Le deuxième cas de rupture d'une voûte* a lieu lorsque, par l'effet de la force horizontale maximum $P\frac{z}{y}$ du voussoir agissant, la culée ou pied-droit glisse sur sa base. Il est évident que ce glissement ne pourra s'effectuer lorsqu'on aura

$$MK > P\frac{z}{y}.$$

K coefficient du frottement de la culée sur sa base; on peut le faire égal à 0.76 (60 et 61).

Les autres lettres ont les mêmes significations qu'au cas précédent.

3° *Le troisième cas de rupture d'une voûte* se présente quand, par la forme de la voûte ou par le mode de répartition de la charge, les pieds-droits tendent à tomber en avant; alors, la voûte s'ouvre à l'intérieur aux reins et à l'extérieur à la clef, comme l'indique la figure 29, planche III. Ce cas peut être considéré comme exceptionnel, et on pourra généralement se dispenser de faire les calculs suivants.

On établit les conditions d'équilibre comme dans le premier cas, en prenant pour axes de rotation des voussoirs les points *a*, *b*, *c*, et pour qu'il y ait stabilité, on trouve que l'on doit avoir

$$H\left(P\frac{z}{y}-\frac{MA}{H}\right)>0, \text{ c'est-à-dire } P\frac{z}{y}>\frac{MA}{H}.$$

$H=ad$ hauteur de la voûte mesurée à l'intrados;
M poids de la demi-voûte;
A distance horizontale du centre de gravité de la demi-voûte au point de rotation c;
P poids du voussoir agissant ab;
z distance horizontale du centre de gravité du voussoir agissant au point de rotation b;
y distance des points de rotation a et b.

Si on n'arrivait pas à $P\frac{z}{y}>\frac{MA}{H}$, on ajouterait un massif de maçonnerie au pied-droit, en dehors de l'arête *c*. Dans ce troisième cas de rupture de voûte, ainsi que dans le deuxième, on a, comme au premier cas, égard à la maçonnerie et à la surcharge qui peuvent reposer sur la voûte.

616. *Épaisseur des voûtes à la clef.* La méthode exposée dans le numéro précédent est une méthode de tâtonnement, puisque l'on part d'une hypothèse sur l'épaisseur de la voûte. Afin de ne pas faire cette supposition au hasard, on a recours à la formule empyrique suivante, que Perronnet a déduite de ses observations,

$$e = 0{,}0347d + 0^{m}{,}325.$$

e épaisseur de la voûte à la clef en mètres;
d distance des pieds-droits, si la voûte est en plein cintre; dans les voûtes surbaissées, d exprime le double du rayon qui a servi à tracer l'intrados dans les voûtes en arc de cercle, et l'arc supérieur de l'intrados dans les voûtes en anse de panier.

Comme, pour des valeurs de *d* supérieures à 30 mètres, la formule donne des épaisseurs trop fortes, il conviendra dans ce cas de se guider, dans sa première hypothèse, sur les constructions existantes (Art. 233).

Partant de l'épaisseur ainsi fixée, on détermine le joint de rupture comme il a été dit n° 615, et par suite la valeur de la poussée horizontale $P\frac{z}{y}$ de chaque voussoir agissant sur le voussoir résistant. Si cette

poussée s'exerçait uniformément sur toute la hauteur e du joint à la clef, il serait facile de calculer quelle devrait être la valeur de e pour y résister; mais remarquons que le voussoir agissant ab, figure 28, planche III, par sa tendance à tourner autour du point a, rend nulle la pression au point intérieur A, tandis qu'elle est maximum au point extérieur a. Il est évident que la voûte ne résistera qu'autant que cette pression maximum au point a ne dépassera pas la limite k que comporte la pierre de la voûte. La pression étant nulle en A, et k en a, supposant que chaque point de e résiste en raison inverse de sa distance au point a, il en résulte que la résistance moyenne est $\frac{k}{2}$, et la résistance totale, $\frac{ke}{2}$. Cette résistance totale peut être représentée par la surface d'un triangle dont la base est k et la hauteur e; son point d'application est situé au centre de gravité du triangle, c'est-à-dire à une distance $\frac{e}{3}$ de la base ou du point a (*Int.*, 1091), et comme le moment de cette résistance, pris par rapport au point de rotation b, doit être égal au moment du poids du voussoir agissant ab, pris par rapport à ce même point b, on doit donc avoir (*Int.*, 1043.)

$$\frac{ke}{2}\left(y-\frac{e}{3}\right)=Pz.$$

Dans cette formule, les longueurs étant représentées en mètres et P en kilogrammes, k exprime le nombre de kilogrammes que peut supporter avec sécurité chaque mètre carré de la pierre qui compose la voûte (213).

La formule ainsi établie donnera la valeur de e, et si cette valeur était différente de celle que l'on a supposée pour déterminer le joint de rupture (615), on déterminerait de nouveau ce joint en adoptant cette seconde valeur de e, et la nouvelle valeur de Pz fournirait pour e une valeur plus approchée (618).

617. *Épaisseur des pieds-droits.* Lorsque les pieds-droits font culée, c'est-à-dire doivent résister à la poussée horizontale de la voûte, il peut arriver qu'ils se renversent en tournant autour de leur arête extérieure. Ce cas ne peut avoir lieu qu'autant que l'inégalité (a) du n° 615 ne serait pas satisfaite, et alors on augmenterait l'épaisseur du pied-droit et par suite z' de manière à y satisfaire. On opérerait d'une manière analogue pour le cas où le pied-droit pourrait tourner autour de son arête intérieure (3° 615).

Il peut arriver aussi que, par suite d'une trop faible épaisseur, le pied-droit glisse sur sa base. Ce glissement ne peut avoir lieu dès que l'inégalité du 2°, n° 615, est satisfaite.

Il peut arriver également que la voûte glisse sur ses naissances; on

vérifiera encore si cet effet est possible à l'aide de l'inégalité du 2°, n° 615, dans laquelle M ne comprendra plus le poids du pied-droit, mais seulement celui de la moitié de voûte qui le surmonte. Ce cas est évidemment celui qui exige la plus grande épaisseur de pied-droit. Cependant, comme l'épaisseur statique calculée pour le renversement est ordinairement plus que suffisante pour résister au glissement, on ne peut s'en tenir à celle caculée d'après le glissement.

Ordinairement on augmente l'épaisseur statique trouvée d'une quantité telle, qu'en y supposant appliquée une pression égale aux 2/3 de la charge totale de la fondation, on n'ait à craindre ni le tassement du sol ni l'écrasement de la pierre. Dans le mémorial du génie militaire, au lieu d'opérer ainsi pour obtenir de la stabilité, on multiplie l'épaisseur statique trouvée par un coefficient égal à 1,38 ou 1,40; on l'a même porté à 1,90, mais cette dernière valeur paraît exagérée.

Dans les anciens ponts, on faisait les arches très-petites et en plein cintre ou en anse de panier, et les piles faisaient culées; mais dans les arches actuelles, que l'on fait grandes et en arc de cercle afin de faciliter la navigation, le joint de rupture étant aux naissances pour un arc dont la montée est le 1/6 ou le 1/8 de l'ouverture, il en résulte que la poussée est trop considérable pour pouvoir établir des piles faisant culée; on se contente de leur donner des dimensions suffisantes pour que les pierres résistent avec sécurité à la charge qu'elles ont à supporter (215), en ayant égard aux effets des glaces et à toutes les autres causes de dégradation.

618. *Méthode graphique* donnée par M. Méry, ingénieur des ponts et chaussées, *pour calculer la stabilité des voûtes.*

Par ce procédé très-pratique, on peut obtenir les divers éléments principaux nécessaires pour déterminer les épaisseurs des voûtes cylindriques de toutes les formes et de leurs pieds-droits.

Lorsqu'une voûte est en équilibre, de quelque manière que, sur chaque joint, la pression se répartisse entre les différents points, l'ensemble des pressions partielles donne une résultante unique appliquée en un point du joint; ainsi, par exemple, pour le joint ab, figure 30, planche III, cette résultante, que nous désignerons par p, sera appliquée au point g, et la voûte devra être tenue en équilibre par cette pression p et par la poussée horizontale P qui agit au sommet de la voûte. Sur chacun des autres joints $a'b'$, $a''b''$, etc., il existe des points g', g'', etc., analogues à g. Tous ces points déterminent une courbe, que M. Méry appelle *courbe des pressions*, qui est très-propre à éclairer sur l'équilibre de la voûte.

Si cette courbe passe au sommet C de la voûte, au point b de l'intrados et au point extérieur A, cela indique que la voûte tend à s'ouvrir à l'intrados au joint C, à l'extrados au joint ab, et que le pied-droit tend à tourner autour de l'arête extérieure A.

La courbe des pressions n'atteignant pas les points C, b et A, mais s'en rapprochant comme l'indique la figure, elle indique encore que ces points sont les plus faibles de la voûte.

La résultante de toutes les pressions qui s'exercent sur le joint ab passant par le point g où la courbe des pressions rencontre ce joint, la moitié des composantes de p agissent sur la portion bg, qui doit y résister sans s'écraser; il en est de même de chacune des portions eA, $b'g'$, $b''g''$, Cg'''.

Nous disons que bg doit être capable de supporter la moitié de la pression qui s'exerce sur le joint ba; mais remarquons que la pression allant en augmentant depuis le point g jusqu'en b, l'arête b s'écraserait si on s'en tenait pour bg à la limite exigée par une demi-pression répartie uniformément.

On n'a rien de bien positif sur la manière dont la pression se répartit sur un joint, mais on admet généralement qu'étant à son maximum en b, elle décroît proportionnellement à la distance de ce point; de sorte que la pression étant moyenne en g, elle est nulle au point h qui donne $hg=2gb$ (la pression totale étant représentée par la surface d'un triangle dont hb est la hauteur, g le centre de gravité, et dont la base, que nous représenterons par k, est proportionnelle à la pression maximum en b (616), en tout autre point, la pression est représentée par la parallèle menée en ce point à la base du triangle).

Cela posé, comme il est évident qu'au point b la pression k ne doit pas dépasser la limite que comporte la pierre, il en résulte que la partie bg doit être capable de supporter une charge représentée par $k \times bg$, et comme la pression totale sur le joint ab est $k \times \frac{3}{2}\, bg$, l'on voit que bg doit être capable de supporter les 2/3 de la charge totale du joint, et non la moitié.

La pression s'exerçant suivant la tangente à la courbe des pressions, cette courbe, par son inclinaison sur les divers joints, sert encore à faire connaître les joints où le glissement est à craindre. α étant l'angle que fait la direction de la pression avec le joint du voussoir, l'effort qui agit suivant la direction du joint pour produire le glissement est $p \cos \alpha$, l'effort normal au joint est $p \sin \alpha$, et 0,76 étant le coefficient de frottement ordinairement adopté, on doit avoir, pour qu'il y ait stabilité, $p \cos \alpha < p \sin \alpha \times 0{,}76$, ou $\cos \alpha < \sin \alpha \times 0{,}76$ (n°s 60, 61 et 73).

619. *Tracé de la courbe des pressions.* Une voûte exigeant, pour sa stabilité, que son épaisseur et celle de ses pieds-droits soient plus considérables que ne l'exige l'équilibre statique, on conçoit que la courbe des pressions peut y prendre une infinité de positions différentes sans qu'il soit possible de préciser celle qui se réalisera, cette position dépendant du tassement, que l'on ne peut prévoir exactement, et des surcharges accidentelles auxquelles la voûte peut être soumise.

Prenons, fig. 31, pl. III, sur le plan des naissances le point *m* paraissant, par ses distances aux points *b* et *a*, devoir appartenir à la courbe des pressions (les parties *bm* et *am* doivent chacune pouvoir supporter sans s'écraser les 2/3 de la charge du joint *ab*) (618); prenons également sur le joint vertical *cd* le point *n* paraissant, par sa distance au point *c*, appartenir à la courbe des pressions, et proposons-nous de tracer cette courbe passant par *m* et *n*, c'est-à-dire de trouver les points en lesquels elle rencontre les joints *ef*, *hi*, etc.

On calcule le poids du voussoir *cdba*, et on détermine la position de son centre de gravité; soit KG la verticale passant par ce centre de gravité; prolongeons cette verticale jusqu'à l'horizontale *n*X, joignons K*m*, prenons KS proportionnel au poids trouvé, et terminant le parallélogramme KSRP, KP est proportionnel à la poussée horizontale, et la diagonale KR à la pression totale *p* sur le joint *ab*. Cela fait, soit *kg* la verticale passant par le centre de gravité du voussoir *cdfe;* prenons *ks* proportionnel au poids de ce voussoir, et *kp* égal à la poussée horizontale KP; construisons le parallélogramme *ksrp;* la diagonale *kr* représente l'intensité et la direction de la pression sur le joint *ef*, et le point *s*, où elle rencontre ce joint, est un des points de la courbe des pressions. Opérant sur le voussoir *cdih* comme sur *cdfe*, on détermine le point *q* où la courbe rencontre le joint *hi*, et par la même marche on déterminerait tous les autres points de cette courbe.

Si les points *m* et *n* ont été mal choisis, on ne tarde pas à s'en apercevoir; la courbe que l'on obtient sort des limites convenables ou conduit à une épaisseur démesurée de pieds-droits; on fait alors une nouvelle hypothèse sur la position de ces points, et on construit une nouvelle courbe, en se servant évidemment des poids et des positions des centres de gravité des voussoirs qui ont été déterminés pour la première courbe.

Supposant que la voûte est construite en matériaux assez résistants pour que la pression puisse s'exercer sur les arêtes des voussoirs sans les écraser, il est évident qu'il y aura équilibre tant que la courbe des pressions ne dépassera en aucun point la limite des voussoirs; mais qu'aussitôt cette limite dépassée, l'équilibre sera rompu si la voûte n'est pas consolidée par des armatures ou des mortiers d'une résistance supérieure à l'effort qui tend à rompre l'équilibre. Avec les matériaux ordinairement employés, les distances de la courbe aux extrémités de chaque joint doivent être telles, que chacune d'elles soit capable de supporter une charge uniformément répartie égale aux 2/3 de la charge totale qui repose sur le joint. Lorsque deux voûtes opposées s'appuient sur un même pied-droit, on peut s'en tenir à l'épaisseur statique, c'est-à-dire à celle où la courbe des pressions passe aux extrémités des joints de la clef, des reins et du plan des naissances; parce que, outre que les poussées contraires rendent tout mouvement du pied-droit impossible,

la maçonnerie qui relie les deux voûtes au-dessus du plan des naissances rend impossible le glissement et le renversement de la partie de voûte comprise entre les naissances et les reins. Il est évident que le massif de maçonnerie qui reliera les deux voûtes doit être construit au moins jusqu'aux joints de rupture des voûtes, avant le décintrement et le chargement.

620. M. Petit, capitaine du génie, a donné les tableaux suivants des valeurs des angles de rupture, c'est-à-dire des angles que forment avec la verticale les rayons menés du centre de la voûte aux joints de rupture. (Extrait du n° 12 du *Mémorial de l'officier du génie*).

1° *Table des angles de rupture, des poussées et des épaisseurs limites des pieds-droits des voûtes en plein cintre à extrados parallèle, sans aucune maçonnerie ni surcharge sur la voûte.*

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	RAPPORT du diamètre à l'épaisseur.	VALEUR de l'angle de rupture.	RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados.		RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.*
			Cas de la rotation.	Cas du glissement.	
2.732	1.154	0° 00′	0.00000	0.08023	
2.70	1.170	13 42	0.00211	0.06262	
2.65	1.212	22 00	0.00310	0.02168	
2.60	1.250	27 30	0.00800	0.88151	
2.50	1.333	35 52	0.02283	0.80340	
2.40	1.428	42 0	0.04100	0.72847	
2.30	1.538	46 47	0.06835	0.65654	
2.20	1.000	51 4	0.08648	0.58707	
2.10	1.810	54 27	0.10020	0.52186	
2 00	2.000	57 17	0.13017	0 45012	1.3223
1.90	2.282	59 37	0.14813	0.39943	1.2320
1.80	2.500	61 24	0.10373	0.34281	1.1414
1.70	2.857	62 53	0.17180	0.28924	1.0484
1.60	3.333	63 40	0.17517	0.23874	0.0525
1.59	2.380	63 52	0.17533	0.23386	0.9427
1.58	3.448	63 55	0.17585	0.22901	0.0329
1.57	3.508	63 58	0.17524	0.22434	0.9233
1.50	3.571	04 1	0.17490	0.21040	0.9131
1.55	3.630	64 3	0.17478	0.21404	0.9031
1.54	3.703	64 5	0.17445	0.20991	0.8031
1.53	3.773	64 7	0.17307	0.20521	0.8831
1.52	3.846	04 8	0.17352	0.20054	0.8730
1.51	3.020	64 8	0.17310	0.10590	0.8028
1.50	4.000	64 0	0.17254	0.10130	0.8527
1.49	4.081	04 8	0.17180	0.18073	0.8424
1.48	4.106	64 8	0.17095	9.18218	0.8320
1 47	4.255	64 7	0.17008	0.17706	0.8210
1.46	4.347	64 6	0.16015	0.17318	0.8112
1.45	4.444	64 5	0.10798	0.10872	0.8007
1.44	4.545	64 3	0.16683	0.16430	0.7962
1.43	4.651	64 0	0.16368	0.15001	0.7084

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	RAPPORT du diamètre à l'épaisseur.	VALEUR de l'angle de rupture.		RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados.		RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.*
				Cas de la rotation.	Cas du glissement.	
1.42	4.701	63	50	0.10448	0.15555	0.7006
1.41	4.878	03	52	0.10317	0.15122	0.7074
1.40	5.000	03	40	0.10107	0.14691	0.7838
1.39	5.128	03	43	0.10014	0.14204	0.7801
1.38	5.263	03	38	0.15845	0.13841	0.7700
1.37	5.400	03	32	0.15072	0.13420	0.7717
1.30	0.555	03	20	0.15482	0.13002	0.7070
1.35	5.714	03	19	0.15287	0.12507	0.7022
1.34	0.082	03	10	0.15090	0.12170	0.7574
1.33	0.000	03	00	0.14896	0.11707	0.7524
1.32	0.204	62	50	0.14078	0.11302	0.7408
1.31	0.451	02	33	0.14510	0.10959	0.7420
1.30	0.066	62	14	0.14330	0.10550	0.7370
1.29	0.000	02	0	0.14013	0.10103	0.7297
1.28	7.142	02	3	0.13091	0.00770	0.7213
1.27	7.407	01	47	0.13430	0.00370	0.7144
1.26	7.002	01	30	0.13157	0.08902	0.7071
1.25	8.000	01	15	0.12847	0.08608	0.0087
1.24	8.333	01	1	0.12510	0.08227	0.0890
1.23	0.095	00	40	0.12201	0.07840	0.6800
1.22	0.090	60	10	0.11887	0.07474	0.0721
1.21	0.523	00	00	0.11516	0.07102	0.0015
1.20	10.000	59	41	0.11140	0.00733	0.0501
1.19	10.520	50	10	0.10701	0.00308	0.0404
1.18	11.111	58	40	0.10417	0.00005	0.0292
1.17	11.704	58	9	0.10021	0.05046	0.0171
1.10	12.500	07	40	0.09593	0.05289	0.0038
1.15	13.333	57	1	0.00170	0.04935	0.5905
1.14	14.285	56	23	0.08729	0.04585	0.5759
1.13	15.384	55	45	0.08254	0.04237	0.5601
1.12	10.000	53	40	0.07700	0.03004	0.5444
1.11	18.181	54	10	0.07273	0.03552	0.5259
1.10	20.000	53	15	0.00754	0.03213	0.5066
1.09	22.222	52	14	0.00177	0.02870	
1.00	25.000	51	7	0.05049	0.02540	
1.07	28.571	49	48	0.05065	0.02217	
1.00	33.333	48	10	0.04455	0.01801	
1.05	40.000	40	32	0.03813	0.01560	
1.04	50.000	44	4	0.03130	0.01249	
1.03	00.666	41	4	0.02450	0.00932	
1.02	100.000	38	12	0.01091	0.00618	
1.01	200.000	32	30	0.00089	0.00308	
1.00	Infini.	0	00	0.00009	0.00000	

Observations sur la table précédente, et usage de cette table.

R rayon de l'extrados;
r rayon de l'intrados;
C rapport de la poussée horizontale maximum agissant à la clef au carré du rayon r.

Pour obtenir la valeur de la poussée horizontale en kilogrammes, par mètre cou-

rant de longueur de voûte, il suffit de multiplier le produit Cr^2 par le poids d'un mètre cube de maçonnerie, qui est ordinairement de 2250 kilogrammes pour le moellon.

L'auteur de cette table remarque que la rupture des voûtes en plein cintre à extrados parallèle n'a lieu que par rotation à l'intérieur autour d'un joint des reins, ou par glissement à l'intérieur sur un des joints.

Les valeurs du rapport C sont calculées, dans les cas de glissement, en supposant le coefficient du frottement égal à 0.577; c'est la valeur donnée par Rondelet pour les parallélipipèdes en pierre de liais, équarris et dressés au grès, glissant sur un plan de même pierre et dressé de même. De ses expériences, Boistard conclut qu'il faut faire ce coefficient égal à 0.76 pour la maçonnerie.

L'examen des valeurs de C fait voir que dès que le rapport $\frac{R}{r}$ descend à 1.44, la poussée horizontale devient plus faible pour produire le glissement que pour produire la rotation; par conséquent pour les voûtes donnant $\frac{R}{r}$ supérieur à 1.44 on adoptera les valeurs de C dues au glissement, et pour celles dont les valeurs de $\frac{R}{r}$ sont de 1.44 et au-dessous on adoptera les valeurs de C dues à la rotation. Un interligne horizontal placé dans les colonnes de la table indique la limite où l'une des valeurs de C commence à surpasser l'autre.

L'épaisseur-limite du pied-droit dont il est question dans la 6e colonne de la table est l'épaisseur qu'il faudrait adopter si la hauteur du pied-droit était infinie. Dans les cas ordinaires de la pratique, quand on n'a pas besoin d'une très-grande stabilité, on peut réduire cette épaisseur-limite de 1/10 environ.

Soit à déterminer, par exemple, l'épaisseur-limite à donner aux pieds-droits d'une voûte à extrados parallèle, de 5 mètres de diamètre, en faisant usage de la table précédente.

On commence par déterminer l'épaisseur de la voûte d'après la formule de Perronnet, ce qui donne

$$e=0.0347d+0.325=0,0347\times5+0.325=0^{m}.498. \quad (616)$$

On a donc $r=2^{m}.50$, $R=2^{m}.998$, et par suite,

$$\frac{R}{r}=1.20.$$

Ce rapport étant moindre que 1.44, la poussée par rotation est supérieure à celle par glissement, et on doit prendre

$$C=0.11140.$$

La poussée par mètre courant est alors

$$0.11140\times r^2\times2250=0.11140\times2.50\times2.50\times2250=1566 \text{ kilog.}$$

L'épaisseur-limite des pieds-droits est, en adoptant la stabilité de Lahire,

$$\sqrt{2C}\times r=0.6504\times2.50=1^{m}.626.$$

Si les pieds-droits, au lieu d'être supposés avoir une hauteur infinie, n'avaient que 3 mètres de hauteur, on pourrait, d'après une application d'une formule de M. Petit, faite par M. Morin, réduire l'épaisseur $1^{m}.626$ à $1^{m}.457$.

2° *Table des angles de rupture, des poussées et des épaisseurs-limites des pieds-droits des voûtes en plein cintre extradossées en chape à 45°. Ce sont des voûtes en plein cintre extradossées parallèlement, mais couvertes d'une chape en maçonnerie, dont le plan supérieur est incliné à 45° à l'horizon et tangent à l'extrados de la voûte.*

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	RAPPORT du diamètre à l'épaisseur.	VALEUR de l'angle de rupture.	RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados.		RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Vauban.*
			Cas de la rotation.	Cas du glissement.	
2.00	2.000	60°	0.26424	0.74361	1.7246
1.90	2.222	60	0.28416	0.65648	1.6204
1.80	2.500	60	0.29907	0.57383	1.5147
1.70	2.857	60	0.30867	0.49564	1.4081
1.60	3.333	60	0.31245	0.42191	1.2990
1.59	3.389	60	0.31249	0.41478	1.2880
1.58	3.448	60	0.31257	0.40841	1.2781
1.57	3.508	61	0.31264	0.40067	1.2660
1.56	3.571	61	0.31246	0.39367	1.2548
1.55	3.636	61	0.31222	0.38673	1.2437
1.54	3.703	61	0.31191	0.37983	1.2318
1.53	3.773	61	0.31153	0.37297	1.2214
1.52	3.846	61	0.31108	0.36615	1.2102
1.51	3.920	61	0.31056	0.35938	1.1989
1.50	4.000	61	0.30996	0.35266	1.1877
1.49	4.081	61	0.30928	0.34598	1.1764
1.48	4.166	61	0.30855	0.33934	1.1650
1.47	4.255	61	0.30772	0.33275	1.1537
1.46	4.347	60	0.30685	0.32621	1.1422
1.45	4.444	60	0.30587	0.31971	1.1308
1.44	4.545	60	0.30485	0.31325	1.1193
1.43	4.651	60	0.30408	0.30684	1.1078
1.42	4.761	60	0.30296	0.30047	1.1008
1.41	4.878_{2}	60	0.30173		1.0986
1.40	5.000	59	0.30001	0.28787	1.0954
1.39	5.128	59	0.29712		1.0914
1.38	5.263	59	0.29706		1.0893
1.37	5.406	59	0.29550		1.0872
1.36	5.555	59	0.29386		1.0841
1.35	5.714	58	0.29285		1.0823
1.34	5.882	58	0.29037		1.0777
1.33	6.060	58	0.28850		1.0742
1.32	6.264	58	0.28654		1.0705
1.31	6.451	57	0.28456		1.0668
1.30	6.666	57	0.28231	0.22756	1.0626
1.29	6.896	57	0.28027		1.0588
1.28	7.142	56	0.27810		1.0547
1.27	7.407	56	0.27578		1.0503
1.26	7.692	55	0.27343		1.0458
1.25	8.000	54	0.27102		1.0412
1.24	8.333	63	0.26850		1.0363
1.23	8.695	53	0.26608		1.0316
1.22	9.090	52	0.26377		1.0272
1.21	9.523	51	0.26074		1.0217

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	RAPPORT du diamètre à l'épaisseur.	VALEUR de l'angle de rupture.	RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados. Cas de la rotation.	Cas du glissement.	RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Vauban.*
1.20	10.000	50°	0.25806	0.17171	1.0160
1.19	10.526	50	0.25546		1.0109
1.18	11.111	49	0.25277		1.0045
1.17	11.764	49	0.25010		1.0002
1.16	12.500	48	0.24742		0.9948
1.15	13.333	47	0.24477		0.9894
1.14	14.285	46	0.24218		0.9842
1.13	15.384	44	0.23967		0.9791
1.12	16.666	43	0.23732		0.9743
1.11	18.181	43	0.23502		0.9695
1.10	20.000	42	0.23292	0.12032	0.9652
1.05	40.000	36	0.22902		0.9571

Les observations de la table 1° s'appliquent également à celle-ci, et pour déterminer l'épaisseur-limite des pieds-droits on suit aussi la même marche; ainsi on commence par déterminer l'épaisseur de la voûte extradossée parallèlement, à l'aide de la formule de Perronnet; on a alors $\frac{R}{r}$, et le tableau donne la valeur de C qui correspond à ce rapport; puis de cette valeur de C on conclut la poussée horizontale, ainsi que l'épaisseur-limite des pieds-droits. En opérant de cette manière, on trouverait, pour une voûte de 8 mètres de diamètre à l'intrados,

$$e = 0^m.6026, \quad \frac{R}{r} = 1.15, \quad C = 0.24477.$$

La poussée horizontale par mètre courant est $0.24477 \times r^2 \times 2250 = 8811$ kilog., et l'épaisseur-limite des pieds-droits est, en adoptant la stabilité de Vauban, $\sqrt{2C} \times r = 0.9894 \times r = 3^m.9576$. Si les pieds-droits avaient 5 mètres de hauteur, on pourrait prendre pour leur épaisseur $3^m.676$.

3° *Table des angles de rupture, des poussées et des épaisseurs-limites des pieds-droits des voûtes en plein cintre extradossées horizontalement. Ce sont des voûtes en plein cintre extradossées parallèlement, et couvertes d'un massif de maçonnerie dont le plan supérieur est horizontal et tangent à l'extrados de la voûte.*

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	RAPPORT du diamètre à l'épaisseur.	VALEUR de l'angle de rupture.	RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados.		RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, stabilité de Lahire.
			Cas de la rotation.	Cas du glissement.	
2.00	2.000	36°	0.05486	0.50358	1.3838
1.90	2.222	39	0.07101	0.43966	1.2925
1.80	2.500	44	0.08850	0.37901	1.2001
1.70	2.857	48	0.10631	0.32164	1.1055
1.60	3.333	52	0.12300	0.26755	1.0082
1.59	3.389	52	0.12453	0.26232	0.9984
1.58	3.448	53	0.12602	0.25712	0.9885
1.57	3.508	53	0.12747	0.25196	0.9784
1.56	3.571	54	0.12837	0.24683	0.9684
1.55	3.636	54	0.13027	0.24173	0.9584
1.54	3.703	55	0.13153	0.23667	0.9483
1.53	3.773	55	0.13289	0.23163	0.9381
1.52	3.846	55	0.13414	0.22664	0.9280
1.51	3.920	55	0.13531	0.22167	0.9177
1.50	4.000	56	0.13648	0.21673	0.9075
1.49	4.081	56	0.13756	0.21183	0.8972
1.48	4.166	56	0.13856	0.20696	0.8868
1.47	4.255	57	0.13952	0.20213	0.8764
1.46	4.347	57	0.14041	0.19733	0.8659
1.45	4.444	57	0.14122	0.19256	0.8554
1.44	4.545	58	0.14195	0.18782	0.8448
1.43	4.651	58	0.14268	0.18312	0.8341
1.42	4.761	58	0.14311	0.17845	0.8234
1.41	4.878	59	0.14376	0.17381	0.8126
1.40	5.000	59	0.14421	0.16920	0.8018
1.39	5.128	59	0.14456	0.16463	0.7909
1.38	5.263	59	0.14481	0.16009	0.7799
1.37	5.406	60	0.14498	0.15558	0.7689
1.36	5.555	60	0.14506	0.15111	0.7577
1.35	5.714	60	0.14504	0.14666	0.7465
1.34	5.882	60	0.14491	0.14225	0.7420
1.33	6.060	61	0.14467		0.7414
1.32	6.264	61	0.14460		0.7412
1.31	6.451	61	0.14390		0.7394
1.30	6.666	61	0.14332	0.12495	0.7379
1.29	6.896	61	0.14264		0.7362
1.28	7.142	62	0.14186		0.7342
1.27	7.407	62	0.14101		0.7320
1.26	7.692	62	0.13988		0.7290
1.25	8.000	62	0.13872	0.10405	0.7260
1 24	8.333	62	0.13737		0.7225
1.23	8.695	63	0.13593		0.7187
1.22	9.090	63	0.13437		0.7145
1.21	9.523	63	0.13263		0.7099

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	RAPPORT du diamètre à l'épaisseur.	VALEUR de l'angle de rupture.	RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados. Cas de la rotation.	Cas du glissement.	RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.*
1.20	10.000	63°	0.13073	0.08397	0.7048
1.19	10.526	63	0.12870		0.6993
1.18	11.111	63	0.12650		0.6933
1.17	11.764	64	0.12415		0.6868
1.16	12.500	64	0.12182		0.6803
1.15	13.333	64	0.11895	0.06471	0.6723
1.14	14.285	64	0.11608		0.6641
1.13	16.384	64	0.11303		0.6553
1.12	16.666	64	0.10979		0.6459
1.11	18.181	65	0.10641		0.6358
1.10	20.000	65	0.10279	0.04627	0.6249
1.09	22.222	66	0.098992		0.6133
1.08	25.000	66	0.094967		0.6007
1.07	28.571	67	0.091189		0.5886
1.06	33.333	68	0 086376		0.5729
1.05	40.000	69	0.081755	0.02865	0.5573
1.04	50.000	70	0.076857		
1.03	66.666	71	0.071853		
1.02	100.000	73	0.066469		
1.01	200.000	74	0.061324		
1.00	Infini.	75	0.055472	0.01185	

Les observations des tables 1° et 2° s'appliquent également à cette dernière, et pour une voûte de 10 mètres de diamètre à l'intrados, la règle de Perronnet donnant

$$e = 0^{m}.672,$$

on conclut $\frac{R}{r} = 1.13$ et $C = 0.11303$.

La poussée horizontale par mètre courant est alors

$$0.11303 \times r^{2} \times 2250 = 6359 \text{ kilog.},$$

et l'épaisseur-limite des pieds-droits, en adoptant la stabilité de Lahire,

$$\sqrt{2C} \times r = 0.6553 \times 5 = 3^{m}.2765.$$

Si les pieds-droits n'avaient qu'une hauteur de 5 mètres, on pourrait prendre pour leur épaisseur $2^{m}.8075$.

621. M. Petit a encore considéré les *voûtes en arc de cercle extradossées parallèlement*. Il convient de distinguer le cas où la moitié α de l'angle au centre correspondant à l'arc de la voûte est plus grand que l'angle de rupture donné par la table 1°, page 814, pour une voûte

en plein cintre extradossée parallèlement et pour une même valeur de $\frac{R}{r}$, et le cas où α est plus petit que cet angle de rupture.

R rayon de l'arc d'extrados;
r rayon de l'arc d'intrados. Ayant r, on détermine l'épaisseur de la voûte à la clef, et par suite R, à l'aide de la règle de Perronnet (616).

1° Si α est plus grand que l'angle de rupture, la poussée horizontale est la même que si la voûte était en plein cintre avec R et r pour rayons, et elle se détermine comme au 1° du numéro précédent. Quant à l'épaisseur-limite E des pieds-droits, on la calcule à l'aide de la formule

$$E = r\sqrt{3{,}8C}.$$

C a la valeur consignée table 1°, page 814.

Dans les cas ordinaires de la pratique, on peut diminuer de 1/10 cette épaisseur-limite.

2° Si le demi-angle α est plus petit que l'angle de rupture donné table 1°, page 814, ce qui a lieu ordinairement en pratique, on détermine le rapport C de la poussée au carré du rayon de l'intrados à l'aide de la table suivante, relative à sept valeurs différentes de α; ayant C, on calcule l'épaisseur-limite des pieds-droits à l'aide de la formule

$$E = r\sqrt{3{,}8C}.$$



Tables des poussées des voûtes en arc de cercle extradossées parallèlement
(l est l'ouverture de la voûte et f la flèche de l'arc d'intrados).

VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$	Rapport C de la poussée au carré d'un rayon, pour						
	$l=4f$, $r=2.500f$, $\alpha=53°7'30''$	$l=5f$, $r=3.625f$, $\alpha=43°36'10''$	$l=6f$, $r=5f$, $\alpha=36°52'10''$	$l=7f$, $r=6.625f$, $\alpha=31°53'26''$	$l=8f$, $r=8.500f$, $\alpha=28°4'20''$	$l=10f$, $r=13f$, $\alpha=22°37'10''$	$l=16f$, $r=32.5f$, $\alpha=14°15'0''$
1.40	0.15445	0.14691	0.14091	0.14001	0.14091	0.14478	
1.35	0.14717	0.13030	0.12587	0.12587	0.12587	0.12405	
1.34	0.14543	0.12987	0.12171	0.12171	0.12171	0.11009	
1.33	0.14364	0.12781	0.11767	0.11767	0.11767	0.11506	
1.32	0.14173	0.12634	0.11362	0.11362	0.11362	0.11106	
1.31	0.13975	0.12486	0.10050	0.10959	0.10050	0.10800	
1.30	0.13704	0.12331	0.10682	0.10550	0.10550	0.10406	
1.20	0.13543	0.12164	0.10563	0.10163	0.10163	0.10016	
1.28	0.13311	0.11988	0.10437	0.00770	0.00770	0.09628	
1.27	0.13068	0.11803	0.10304	0.09370	0.00379	0.09244	
1.20	0.12815	0.11009	0.10160	0.08902	0.08992	0.08862	
1.25	0.12547	0.11402	0.10000	0.08668	0.08008	0.08483	0.07189
1.24	0.12270	0.11251	0.09850	0.08549	0.08227	0.08108	0.06862
1.23	0.12031	0.10958	0.09670	0.08423	0.07849	0.07735	0.06547
1.22	0.11675	0.10725	0.00499	0.08291	0.07474	0.07366	0.00234
1.21	0.11354	0.10400	0.00305	0.08148	0.07102	0.06000	0.05924
1.20	0.11023	0.10196	0.09102	0.07909	0.06081	0.06636	0.05616
1.10	0.10676	0.00915	0.08885	0.07834	0.00859	0.06275	0.05311
1.18	0.10313	0.00617	0.08653	0.07651	0.06727	0.05018	0.05008
1.17	0.00934	0.09303	0.08408	0.07468	0.06583	0.05212	0.04700
1.16	0.00537	0.08075	0.08144	0.07264	0.06420	0.05004	0.04411
1.15	0.00123	0.08634	0.07806	0.07050	0.00250	0.04904	0.04116
1.14	0.08690	0.08257	0.07568	0.06812	0.06077	0.04803	0.03824
1.13	0.08238	0.07869	0.07251	0.06558	0.05800	0.04671	0.03534
1.12	0.07764	0.07450	0.06911	0.06207	0.05050	0.04451	0.03247
1.11	0.07269	0.07042	0.06548	0.00020	0.05421	0.04384	0.02902
1.10	0.00737	0.06563	0.06158	0.05666	0.05160	0.04214	0.02681
1.00	0.06211	0.06077	0.05739	0.05345	0.04871	0.04023	0.02401
1.08	0.05630	0.05652	0.05288	0.04934	0.04552	0.03806	0.02192
1.07	0.05052	0.05011	0.04804	0.04426	0.04200	0.03560	0.02111
1.06	0.04431	0.04428	0.04280	0.04058	0.03861	0.03276	0.02002
1.05	0.03770	0.03804	0.03700	0.03550	0.03357	0.02044	0.01882
1.04	0.03006	0.03144	0.03005	0.02002	0.02862	0.02561	0.01720
1.03	0.02378	0.02437	0.02424	0.02360	0.02203	0.02131	0.01524
1.02	0.01625	0.01681	0.01600	0.01673	0.01640	0.01546	0.01100
1.01	0.00834	0.00871	0.00886	0.00880	0.00885	0.00862	0.00747

Pour une voûte extradossée parallèlement, dont $\alpha = 28° \ 4' \ 20''$, $l = 8f = 8$ mètres et $r = 8{,}5f = 8^{m},5$, la formule de Perronnet (616) donne pour l'épaisseur de la voûte à la clef

$$e = 0^m,915, \quad \text{d'où} \quad R = 9^m,415 \quad \text{et} \quad \frac{R}{r} = 1,107.$$

Ce rapport tombant entre les valeurs 1,10 et 1,11 du tableau, la différence des valeurs de C correspondant à 1,107 et à 1,11 se détermine à l'aide de la proportion

$$(1,11 - 1,10) : (0,054\,21 - 0,051\,60) :: (1,11 - 1,107) : x,$$

qui donne $x = 0,000\,783$; donc $C = 0,05343$.

L'épaisseur-limite des pieds-droits est alors

$$E = 8,5\sqrt{3,8 \times 0,05343} = 3^m,825.$$

Pour une hauteur de pieds-droits de $4^m,25$ on pourrait faire $E = 3^m,244$.

Glissement des voûtes en arc de cercle sur les joints de leurs naissances. Le frottement, par mètre courant, de la voûte sur le joint de chaque naissance a pour expression, en adoptant ici 0,76 pour coefficient de frottement,

$$0,38\,\alpha\left(\frac{R^2}{r^2} - 1\right) r^2 \times 2250 \text{ kilog.}$$

α est le demi-arc, exprimé en mètres, qui correspond à l'angle au centre correspondant à l'arc de la voûte, l'arc α étant décrit avec un mètre pour rayon; ainsi, pour un angle au centre de 25°, on a $\alpha = \frac{25 \times 2 \times 3.14}{360} = 0^m.436$.

La poussée horizontale par mètre courant est, en prenant pour C la valeur consignée au tableau précédent,

$$Cr^2 \times 2250 \text{ kilog.}$$

Pour le système $l = 4f$, la poussée surpasse le frottement quand $\frac{R}{r}$ est égal ou inférieur à 1,06. Pour les systèmes $l = 5f$, $l = 6f$, $l = 7f$, $l = 8f$ et $l = 10f$, le glissement commence à $\frac{R}{r} = 1,15$. Pour le système $l = 16f$ et tous les systèmes plus surbaissés, le glissement a lieu quelle que soit l'épaisseur de la voûte.

Lorsque la poussée dépasse le frottement, il faut employer des tirants, arcs-boutants, etc., capables de résister à l'excès de la poussée sur le frottement.

Pour les voûtes en anse de panier, on calculera l'épaisseur à donner aux pieds-droits comme pour une voûte en arc de cercle de même ouverture et de même flèche.

622. *Théorie des voûtes par* M. Yvon Villarceau, théorie qui a valu à son auteur l'approbation la plus flatteuse de la part de l'Académie.

Comme le fait voir ce qui précède, les ingénieurs et les architectes qui s'étaient occupés de la théorie si délicate des voûtes, supposant connues les formes de l'intrados et de l'extrados, avaient cherché les conditions d'équilibre que ces formes exigeaient, afin d'en conclure le mode de répartition des charges le plus favorable à la stabilité. La pratique exigeant une répartition de charges assez rigoureusement déterminée, on conçoit les difficultés que l'on doit éprouver pour satisfaire le plus convenablement possible aux conditions de stabilité d'une voûte; aussi ces conditions sont-elles rarement satisfaites d'une manière rigoureuse.

M. Yvon Villarceau, pour arriver à satisfaire d'une manière certaine, et la plus convenable, aux conditions d'équilibre, envisage la question sous un point de vue tout différent : ainsi, prenant précisément pour inconnues les données de la théorie habituelle, il se propose de rechercher les formes d'intrados et d'extrados qui assureront la plus grande stabilité d'une voûte destinée à supporter des charges dont les intensités et le mode de répartition sont fixés d'avance par les exigences de la pratique, et cela, tout en fixant, *à priori*, le flèche et l'ouverture de l'arche. C'est ainsi que le problème se présente ordinairement dans la pratique.

Pour établir ces conditions d'équilibre, M. Yvon Villarceau fait deux hypothèses :

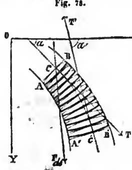


Fig. 78.

D'abord, il imagine que, sans altérer en rien le poids des voussoirs et la position de leurs centres de gravité (cette position suppose les voussoirs infiniment minces et les plans de joints normaux à la courbe cc' passant par les centres de gravité de ces voussoirs), on leur donne la forme indiquée par la fig. 78, c'est-à-dire qu'on les taille de telle manière qu'ils ne soient en contact que suivant les arêtes ou génératrices qui ont leurs pieds sur la courbe cc' des centres de gravité des voussoirs.

Ensuite il fait abstraction du frottement et de la résistance qu'oppose l'adhésion du mortier au glissement des voussoirs les uns sur les autres, qui du reste ne se développent pas en se conformant aux dispositions indiquées par la théorie.

Il est évident que si l'équilibre peut exister dans un système établi suivant ces hypothèses, il subsistera *à fortiori* lorsqu'on remplacera le contact des arêtes par celui des plans de joint, et que l'adhésion des

mortiers ainsi que le frottement pourront prendre naissance, le rôle de ces dernières forces étant de s'opposer au glissement, quand il tend à se produire.

Seulement, il faut remarquer que la pression T, qui se répartirait également sur tous les points du plan du joint, dans le cas où elle passerait par le centre de gravité de ce joint, ne se partagera pas également entre tous ces points, puisque les centres de gravité des faces des voussoirs ne se trouvent pas sur la courbe *cc'*, mais se projettent sur les points milieux de l'épaisseur de la voûte. Les centres de gravité des volumes des voussoirs se projetant plus près de l'extrados que ceux des faces de joint, on voit que lorsqu'on remplacera les arêtes de contact par les faces de joint, la pression par unité de surface sera plus grande vers l'extrados que vers l'intrados. Mais les distances des points de la courbe *cc'* aux points milieux des épaisseurs qui leur correspondent étant très-petites, on peut généralement ne pas tenir compte de cette inégale répartition des pressions; la pression maximum ne différera que très-peu de la pression moyenne. D'ailleurs il suffira, pour faire disparaître cette inégalité, de *refouiller* le joint à l'intrados, à une profondeur très-petite, et telle que la courbe des centres de gravité *cc'* passe par le milieu du joint réel; dans la pratique cette précaution est négligeable.

Il y a un grand avantage à ce que la résultante des pressions passe très-près du milieu de l'épaisseur, et soit en même temps normale au plan de joint; car si la voûte est soumise accidentellement à des charges auxquelles on n'aura point eu égard en fixant les conditions de son établissement, l'action de celles-ci sera, tant que l'équilibre pourra subsister, de déplacer le point d'application de la résultante des pressions, en faisant varier son intensité et sa direction. Or, pour que cette résultante puisse se déplacer dans un sens ou dans l'autre, sans trop se rapprocher de l'extrados ou de l'intrados, ni trop s'écarter de la direction de la normale, il est évident qu'elle doit passer par le milieu de l'épaisseur et être normale au joint lorsque les surcharges dont il s'agit n'ont pas lieu, c'est-à-dire lorsque la voûte est seulement soumise à l'action des forces qu'on a fait entrer dans le calcul de son établissement.

Cela posé, considérant l'équilibre d'une portion quelconque *cc'* de voussoirs du système de la fig. 78, soient x, y, et x', y' les coordonnées de c et c'.

Les forces extérieures de ce système sont :

T pression agissant en c;
T' pression agissant en c';
dP les poids des voussoirs;
Fds les autres forces extérieures qui agissent sur les divers points du système et passent par les centres de gravité des voussoirs.

Ces diverses forces étant dans un même plan, trois des six conditions d'équilibre d'un système solide sont satisfaites, et il ne reste qu'à appliquer les trois autres (*Int.*, 1203 et 1206).

Deux de ces équations, (1) et (2), expriment que la somme des projections des forces extérieures sur chacun des axes X, Y est nulle; la troisième, (3), exprime que la somme des moments de ces forces ou de leurs composantes par rapport à un troisième axe perpendiculaire aux deux premiers à l'origine O est également nulle.

$$T \cos \alpha - T' \cos \alpha' + \int_x^{x'} F_x ds = 0. \qquad (1)$$

$$T \sin \alpha - T' \sin \alpha' + \int_x^{x'} F_y ds + \int_x^{x'} dP = 0. \qquad (2)$$

$$x T \sin \alpha - x'T' \sin \alpha' - (y T \cos \alpha - y' T' \cos \alpha')$$
$$+ \int_x^{x'} x F_y ds - \int_x^{x'} y F_x ds + \int_x^{x'} x dP = 0. \qquad (3)$$

L'indice x ou y indique, par exemple, que F_x est la projection de la force F sur l'axe des x, et F_y celle de F sur l'axe des y.

Or remarquons que ces équations devant avoir lieu pour un intervalle quelconque cc', compté sur la courbe des centres de gravité, elles subsisteront encore lorsque cet intervalle sera infiniment petit et égal à ds. Dans ce cas, x' deviendra $x + dx$, et les quantités α' et T', qui sont des fonctions de x', deviendront $\alpha + d\alpha$, et $T + dT$, de telle sorte que l'on aura

$$T' \cos \alpha' - T \cos \alpha = (T + dT) \cos (\alpha + d\alpha) - T \cos \alpha = d\,(T \cos \alpha),$$

et de même

$$T' \sin \alpha' - T \sin \alpha = d\,(T \sin \alpha),$$

tandis que les intégrales contenues dans ces mêmes équations se réduiront à un de leurs éléments.

En supposant donc l'intervalle cc' infiniment petit, et ayant égard aux remarques précédentes, les équations d'équilibre (1) et (2) deviennent :

$$d\,(T \cos \alpha) = F_x ds, \qquad (4)$$

$$d\,(T \sin \alpha) = F_y ds + dP. \qquad (5)$$

Quant à l'équation (3), elle prend une forme telle, qu'il est facile de voir qu'elle est une conséquence des équations (4) et (5).

Ces deux dernières équations étant applicables à un élément quelconque de la voûte, elles expriment les conditions nécessaires et suffisantes pour assurer l'équilibre du système.

Appelant :

ε l'épaisseur AB de la voûte au point dont les coordonnées sont x et y (fig. 78) ;

t la pression moyenne sur la face AB, lorsque les surfaces de contact sont rétablies. La pression maximum par unité superficielle différant très-peu de t dans le joint AB, on peut poser $T=\lambda\varepsilon t$;

λ la dimension du joint, parallèlement à l'axe de la voûte ;

ω le poids de l'unité de volume des matériaux dont est construite la voûte ;

j la largeur du voussoir, mesurée suivant la courbe passant par le milieu des épaisseurs des voussoirs, et différant très-peu de la largeur mesurée suivant la courbe cc' des centres de gravité ;

ρ le rayon de courbe de cc' ;

δ la distance de la courbe cc' au milieu de l'épaisseur de la voûte ;

2δ la profondeur du refouillement des joints ;

s la longueur de la courbe cc', et ds celle de son élément ;

$\mu=\frac{t}{\omega}$,

on a :

$$T=\lambda\varepsilon t,\quad T\cos\alpha=\lambda\varepsilon t\frac{dx}{ds},\quad T\sin\alpha=\lambda\varepsilon t\frac{dy}{ds},$$

et

$$dP=\omega\lambda\varepsilon j=\omega\varepsilon ds\left(1-\frac{\delta}{\rho}\right); \tag{6}$$

d'où il résulte, pour équations d'équilibre, en substituant ces valeurs dans les équations (4) et (5) et divisant tout par λ :

$$\left.\begin{aligned} d\left(\varepsilon t\frac{dx}{ds}\right)&=\frac{F_x ds}{\lambda}\\ d\left(\varepsilon t\frac{dy}{ds}\right)&=\frac{F_y ds}{\lambda}+\omega\varepsilon\left(1-\frac{\delta}{\rho}\right)ds \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

On a aussi

$$1-\frac{\delta}{\rho}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{1-\frac{1}{3}\frac{\varepsilon^2}{\rho^2}}, \tag{8}$$

d'où

$$\frac{\varepsilon}{\rho}=\sqrt{12\frac{\delta}{\rho}\left(1-\frac{\delta}{\rho}\right)}, \tag{8 bis}$$

et

$$\frac{\delta}{\rho}=\frac{\frac{1}{12}\frac{\varepsilon^2}{\rho^2}}{\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{1-\frac{1}{3}\frac{\varepsilon^2}{\rho^2}}}. \tag{9}$$

Formule de laquelle on tire, pour valeur approchée aux quantités près du quatrième ordre,

$$\frac{\delta}{\rho}=\frac{1}{12}\frac{\varepsilon^2}{\rho^2}; \tag{9 bis}$$

ce qui confirme ce qui a été avancé sur la petitesse de la distance de cc' au milieu de l'épaisseur de la voûte.

Les équations (7) servent de base à la discussion des diverses questions que peut présenter la théorie des voûtes.

Questions à résoudre. Les équations (7) contiennent, outre la variable x, que l'on peut prendre pour variable indépendante, les variables y, ε, t, F_x, F_y, qui sont des fonctions connues ou inconnues de x. Or ces cinq quantités ne sont liées entre elles que par deux équations : on peut donc se donner arbitrairement trois d'entre elles, et les équations serviront à faire connaître les deux autres. Toutefois, on observe que les deux variables F_x et F_y n'équivalent qu'à une seule, la force F, qu'on ne peut assigner sans fixer à la fois son intensité et sa direction, c'est-à-dire sans fixer à la fois ses deux composantes F_x et F_y.

On voit qu'on pourra résoudre, à l'aide des équations (7), six séries de questions qu'on peut écrire analytiquement, étant donnés :

$$t \text{ et } F,\quad \varepsilon \text{ et } F,\quad y \text{ et } F,\quad y \text{ et } \varepsilon,\quad y \text{ et } t,\quad \varepsilon \text{ et } t,$$

trouver respectivement :

$$y \text{ et } \varepsilon,\quad y \text{ et } t,\quad \varepsilon \text{ et } t,\quad t \text{ et } F,\quad \varepsilon \text{ et } F,\quad y \text{ et } F.$$

Il est à remarquer que les trois premières questions sont déterminées, parce qu'on suppose F donnée d'intensité et de direction en fonction de x, et qu'il reste à déterminer, dans chaque cas, deux inconnues au moyen de deux équations.

Les trois derniers problèmes sont indéterminés sous la forme donnée ici à leur énoncé, parce que la force F représente deux inconnues : F_x, F_y, et qu'il y aurait à déterminer les valeurs de trois inconnues au moyen de deux équations; on devra donc, en outre, se donner la direction de F, ou l'une de ses composantes, dans chacun de ces trois derniers cas.

Les données que l'on voudra choisir dans le tableau précédent pouvant être établies d'une manière quelconque en fonction de x, on conçoit que chacun des six cas présentés peut lui-même donner lieu à une infinité de questions.

Première série de questions. Étant donnés t et F, trouver y et ε.

Comme il convient en pratique que la pression par unité de surface soit constante et égale à la pression maximum que l'on peut faire supporter à la pierre, toutes les fois que l'on pourra prendre t arbitrairement, on le choisira de manière à satisfaire à ces conditions.

Quant à la valeur de F, elle dépend des questions qu'on se propose de résoudre.

Par exemple, on peut supposer $F = 0$, ce qui revient à dire que la voûte que l'on considère ne sera soumise qu'à l'action de son propre poids, ou qu'elle n'aura d'autre objet que de recouvrir un espace déterminé.

Dans les ponts, la valeur de F peut être donnée, du moins hypothétiquement.

Si la voûte était recouverte d'eau, la valeur de F serait celle de la pression normale, proportionnelle à la profondeur de la partie considérée de l'extrados au-dessous de la surface de l'eau.

M. Yvon Villarceau, en intégrant les formules différentielles précédentes, résout d'abord le problème : étant donné t constant et $F = 0$, trouver y et ϵ, c'est-à-dire déterminer la forme d'une voûte pressée seulement à ses extrémités, et dans laquelle la pression par unité de surface, au contact de chacun des plans normaux, soit constante et égale à celle qu'il convient de faire supporter aux matériaux.

M. Yvon Villarceau résout ensuite le même problème pour les voûtes qui supportent, outre le poids de leurs voussoirs, une surcharge agissant normalement à la courbe des centres de gravité des voussoirs, circonstance qui ne se réalise rigoureusement qu'autant que la voûte est chargée d'un liquide, mais dont on se rapproche pour une surcharge en maçonnerie, semblable à celle des voûtes de ponts par exemple, en appareillant l'extrados suivant une courbe continue, et non en redans comme on avait l'habitude de le faire.

Dans un récent travail, M. Yvon Villarceau a réduit en tables les résultats que fournissent ses formules fondamentales. Ces tables et quelques formules empiriques donnent tous les éléments nécessaires à l'établissement des voûtes.

Nous terminerons en disant que M. Yvon Villarceau, par l'application de sa théorie à un certain nombre d'arches en anse de panier des ponts les plus célèbres qui existent, a reconnu que toutes pèchent plus ou moins gravement contre l'emploi économique des matériaux et contre le rapport qui doit exister entre la flèche et l'ouverture. Ce rapport doit, pour les voûtes en anse de panier, rester compris entre 1/3 et 1/4, et ne jamais atteindre ni l'une ni l'autre de ces limites, comme on l'a presque toujours fait jusqu'à présent; il doit se rapprocher du 1/3 dans les arches d'une faible ouverture, et du 1/4 dans celles à grande portée. Au 1/4, les pierres ne sont plus assez résistantes; au 1/3, les épaisseurs fournies par la théorie devraient, pour satisfaire à toutes les conditions qu'on s'est imposées, recevoir des valeurs considérables, et les pressions dans les joints seraient faibles, ce qui impliquerait un vice d'économie dans l'emploi des matériaux. La forme de plein cintre répond à des charges infiniment grandes, et ne convient par conséquent pas aux arches de ponts. Celle des tunnels s'en rapproche au contraire en raison des charges considérables que leurs voûtes ont à supporter.

M. Yvon Villarceau a reconnu que dans la plupart de nos grands ponts on aurait pu réduire d'un tiers environ l'épaisseur des voûtes

qui ont été surbaissées au 1/5, sans faire subir aux voussoirs des pressions excédant le dixième, ou même le quinzième des charges de rupture, et cela, en diminuant convenablement la flèche, ce qui eût permis d'exhausser les naissances sans changer le niveau du pavé de la chaussée. Cet exhaussement, joint à la réduction de l'épaisseur à la clef, eût offert au passage des eaux un débouché plus considérable, en même temps qu'il eût facilité la navigation. Ainsi, au pont de Roanne, les naissances eussent pu être élevées de 80 centimètres, et la clef être réduite à 92 centimètres d'épaisseur. Il n'en fallait peut-être pas davantage pour sauver ce pont de la ruine qui l'a atteint dans le débordement de la Loire.

M. Yvon Villarceau a calculé tous les éléments de trois arches différentes : l'une, dite en arc de cercle, établie sur les données du pont d'Iéna, c'est-à-dire ayant 25 mètres d'ouverture et 3 mètres de flèche, une seconde, aussi dite en arc de cercle, de 45 mètres d'ouverture et 5 mètres de flèche; la troisième, en anse de panier, de 60 mètres d'ouverture et 16^{m},25 de flèche. L'épaisseur de 1^{m},86 et la pression horizontale à la clef seraient les mêmes dans la voûte en anse de panier de 60 mètres d'ouverture que dans celle dite en arc de cercle de 45 mètres. La pression dans le joint des naissances serait représentée par une colonne de pierre de 112 mètres de hauteur, ce qui est bien inférieur au dixième de la charge de rupture des matériaux d'excellente qualité, qu'on emploie dans ces sortes de constructions. Une telle arche serait la plus hardie qui eût jamais été construite de main d'homme.

Au pont d'Iéna, la distance maximum de l'intrados théorique à l'arc de cercle qui existe, et qui a même ouverture et même flèche, est de 14 centimètres; ce maximum a lieu à une distance horizontale de l'axe de la voûte égale aux 7/10 de la demi-ouverture. Dans l'arche de 45 mètres, l'écart maximum de l'arc de cercle au-dessous de l'intrados théorique est de 30 centimètres, et comme dans le cas précédent et dans le suivant il se trouve encore aux 7/10 de la demi-ouverture à partir de l'axe de la voûte. Dans la voûte en anse de panier de 60 mètres d'ouverture, le plus grand écart entre l'intrados théorique et l'ellipse qui a pour grand axe l'ouverture de l'arche et pour demi-petit axe la flèche, est de 40 centimètres.

Les écarts qui existent entre l'exécution et la théorie sont bien rarement négligeables. Ainsi M. Yvon Villarceau prouve que quand il est d'un sixième de l'épaisseur, comme dans la voûte dite en arc de cercle de 45 mètres d'ouverture, la pression vers l'extrados devient double de la pression uniforme qui a lieu sur le joint correspondant dans sa construction, tandis qu'elle est nulle à l'intrados. Dans la voûte en anse de panier, où l'écart de 40 centimètres est de beaucoup supérieur au sixième de l'épaisseur de la voûte, le joint tend à s'ouvrir à l'intrados jusqu'à une profondeur de 14 centimètres, tandis qu'à l'extrados la pression

est égale à deux fois et un dixième celle qui a lieu uniformément sur tout le joint de l'arche proposée.

Avant de passer à la construction proprement dite des voûtes, nous ferons mention de l'*Étude sur la stabilité des voûtes*, par M. Carvallo, ingénieur des ponts et chaussées, dans laquelle MM. les ingénieurs et constructeurs trouveront des renseignements théoriques et pratiques bien propres à les éclairer dans l'établissement de ces constructions (*Annales des ponts et chaussées*, 1853).

623. La *construction des voûtes* comprend quatre phases distinctes (549): 1° l'établissement et le levage des cintres; 2° l'exécution de la maçonnerie sur cintres; 3° le décintrement; 4° les travaux complémentaires qui ne doivent être faits qu'après le décintrement.

Cintres. Les cintres de ponts s'exécutent en charpente. L'espacement des *fermes* varie de 1m,25 à 2m,00. A égalité, et même avec un léger excès de dépense, on doit donner la préférence aux fermes peu espacées, lesquelles, étant moins chargées, se prêtent mieux à un décintrement méthodique et gradué. Les couchis se posent jointifs lorsque les voûtes sont en petits matériaux; ils forment ainsi une espèce de plancher sur lequel les ouvriers circulent. Quand au contraire les voûtes sont en pierres de taille, les couchis sont espacés entre eux, car alors il suffit qu'au milieu de chaque rang de voussoirs réponde une file de couchis, de manière que tous les joints correspondent à un espace libre et soient accessibles par-dessous. La largeur des couchis varie de 1 fois à 3 fois au plus leur épaisseur.

Les fermes de cintres peuvent être combinées suivant trois principes différents : ou bien ces fermes ne sont soutenues qu'à leurs naissances par la maçonnerie, qui supporte à la fois la charge verticale et la poussée horizontale de ces fermes, on dit alors que les cintres sont *retroussés;* ou bien il existe, d'une naissance à l'autre, un certain nombre de points fixes dont l'effet est réellement de partager la ferme totale en plusieurs autres de moindre ouverture, on dit alors que les cintres sont *fixes;* enfin on emploie encore un système *mixte*, qui consiste à établir d'abord les fermes de manière qu'elles puissent être soutenues sur leurs deux naissances seulement, puis à les étayer, pendant la construction, au moyen d'un certain nombre d'appuis fixes. On trouve dans cette dernière disposition l'avantage de pouvoir partager en deux l'effet du décintrement, en supprimant d'abord les étais, puis en n'enlevant le cintre proprement dit qu'après le premier effet du tassement.

Quelle que soit la composition d'un appareil de cintre, il est indispensable qu'il soit *contre-venté*, c'est-à-dire que les fermes soient reliées entre elles par des moises horizontales ou en écharpe. De plus, il est indispensable : 1° *d'empêcher le relèvement du sommet des fermes au moyen de grandes moises ou de brides partant de ce sommet et fixées vers les naissances*, et *d'ailleurs au moyen d'une surcharge*

provisoire sur le sommet pendant la construction des reins ; 2° de ramener autant que possible tous les efforts à des résultantes horizontales qui se neutralisent réciproquement, en montant la voûte symétriquement des deux côtés à la fois.

Lors de la pose des cintres, la plupart des constructeurs ont l'habitude de donner aux fermes un certain surhaussement, dont l'objet est de contre-balancer à peu près l'abaissement du sommet de la voûte qui peut résulter, tant du tassement du cintre pendant la construction que de celui de la voûte elle-même après le décintrement. Dans l'état actuel de la science, et quoique plusieurs constructeurs se soient beaucoup occupés de cette question, le mode et la quantité de surhaussement ne peuvent absolument point être calculés, et, à cet égard, force est d'agir un peu au hasard.

Cet exhaussement des cintres paraît bien motivé par les tassements suivants observés après le décintrement de quelques ponts.

PONTS.	SYSTÈME.	OUVERTURES.	TASSEMENTS.
De Nemours. . . .	En arc de cercle.	16m.20	0m.203
De Nogent.	En anse de panier.	29 .25	0 .446
De Neuilly.	*Id.*	39 .00	0 .660
De Mantes.	*Id.*	39 .00	0 .557
De Saint-Sauveur.	*Id.*	23 .38	0 .221
D'Iéna.	En arc de cercle.	28 .00	0 120

Ce tableau montre qu'aux ponts Saint-Sauveur et d'Iéna le tassement a été beaucoup moindre qu'aux ponts construits antérieurement. Dans les ponts plus récents, par suite de la moindre épaisseur des joints, qui ne doit jamais dépasser 0m,02, du soin apporté à les remplir et surtout de la meilleure qualité des mortiers, le tassement a encore été bien moindre; ainsi au *pont aux Doubles* et au *petit Pont*, qui viennent d'être reconstruits en meulière hourdée en ciment de Vassy, on n'a reconnu aucun tassement après le décintrement, malgré la grande hardiesse de ces ponts, qui sont en arc de cercle. Avec les mortiers de chaux il est impossible sans doute d'obtenir un pareil résultat; mais leurs qualités permettent cependant de donner à la courbe du cintre rigoureusement celle du projet, sans l'exhausser au sommet, et même de ne pas élever ses naissances, un léger tassement de tout l'ensemble étant en général de peu d'importance.

Pose des voussoirs. Pour faire cette opération, on commence d'abord par établir la division des voussoirs, conformément à l'épure, à chacune des extrémités du cintre, en marquant ces points de division, soit par de petites encoches sur les couchis, soit en y clouant des pointes;

puis, lors de la pose de chaque rang de voussoirs, on trace, au moyen de règles, sur les couchis, la ligne d'arrase du lit supérieur de ce rang, en donnant des points intermédiaires avec des *nivelettes*, ou en tendant un cordeau entre les points marqués aux extrémités du cintre.

Le principe de la non-continuité des joints dans deux assises contiguës doit être rigoureusement observé.

Afin de diriger tous les plans de joints normalement à l'intrados, on se sert d'une ou de plusieurs fausses équerres levées sur l'épure de la voûte, et dont l'un des côtés est une certaine longueur de l'arc d'intrados, tandis que l'autre côté est normal à cet arc. Si l'intrados est tracé à plusieurs centres, il faut changer ces fausses équerres chaque fois qu'on passe d'un arc à l'autre. Au pont Notre-Dame, dont les voûtes sont en ellipse, ce qui a nécessité un panneau en volige pour chaque assise de voussoirs, on a remplacé les fausses équerres en traçant au chantier, sur la tête de chaque voussoir, une ligne bien apparente qui devait être verticale après la pose du voussoir.

Les voussoirs se posent sur un lit de mortier, sur lequel on les tasse avec un maillet en bois, de manière que l'épaisseur des joints soit uniforme et de un centimètre et demi pour les voûtes de grandes dimensions, et au moins de 8 millimètres pour les petites.

Les deux côtés de la voûte se montent en même temps, d'abord pour que leurs poussées se fassent équilibre sur le cintre et ne le détruisent pas, et ensuite pour que, les mortiers prenant la même consistance des deux côtés, le tassement soit égal. Il convient aussi de ne commencer une nouvelle assise de voussoirs que quand celle inférieure est entièrement posée. Au pont Notre-Dame on s'est écarté de ces prescriptions, ainsi on a commencé par poser sur cales tous les voussoirs en pierre de taille formant les deux têtes, puis on a fiché les joints en ciment de Vassy. Ces deux têtes terminées, on a procédé à la pose des voussoirs intermédiaires, qui sont de forts moellons piqués dont deux assises forment une assise des têtes ; comme pour les têtes, on a posé ces moellons sur cales, et on les a fichés en ciment au fur et à mesure, mais de manière à avoir toujours au moins deux assises non fichées, afin de ne pas déranger les voussoirs posés. Une fois le premier rouleau posé sur tout le cintre, on a complété l'épaisseur de la voûte entre les têtes, puis fait le remplissage des reins et établi les chapes en ciment et bitume. On conçoit que par ce mode d'opérer, la charge des cintres se trouve bien diminuée et placée progressivement.

La partie la plus délicate de l'exécution d'une voûte est sa *fermeture*, qui doit être faite de manière à limiter, autant que possible, l'abaissement au sommet lors du décintrement, lequel résulte, comme nous l'avons dit, en grande partie de la compression des mortiers. Cette opération se fait de plusieurs manières distinctes, dont la plus communément suivie est celle que nous avons décrite au n° 549.

Quelques constructeurs emploient le moyen suivant, qui consiste, après avoir recouvert d'un lit de mortier les joints des contre-clefs, à suspendre la clef au-dessus de l'espace qu'elle doit occuper au moyen d'une louve et d'une petite chèvre, et à la laisser tomber à sa place en la dirigeant en conséquence. Cette opération bien réussie peut donner des résultats satisfaisants; mais elle nous paraît d'une exécution tellement difficile, que nous pensons qu'il est prudent de donner la préférence à la manière d'opérer indiquée au n° 549, ou à la suivante, qui la remplace avec de grands avantages.

Cette troisième méthode consiste à poser à sec sur les cintres les contre-clefs et la clef, en les espaçant avec des cales de manière à réserver l'épaisseur des joints, et à ficher ensuite ces derniers avec du mortier de ciment, que l'on a soin de ne pas gâcher trop clair; en ébranlant légèrement chaque pierre on peut faciliter la pénétration du mortier en tous les points.

Voûtes en petits matériaux. Pour les voûtes en moellons, briques, etc., le mode d'exécution est à peu de chose près le même que pour celles en pierre de taille (549). Les joints ne doivent pas se correspondre dans deux assises voisines, et quand la voûte est en moellons ou en meulières piqués, ou en briques, il faut tracer les joints longitudinaux sur les couchis. L'ouvrier doit poser chaque voussoir en le frottant sur les couchis du cintre, afin que son parement de douelle s'y applique bien et qu'il ne reste pas de mortier interposé; autrement il en résulterait des balèvres d'un aspect désagréable après le décintrement, et que l'on ne pourrait faire disparaître qu'en retaillant l'intrados.

La voûte du *pont aux Doubles*, à Paris, a été construite en meulière hourdée en ciment de Vassy; elle a 31 mètres d'ouverture, 3m,10 de flèche, 1m,30 d'épaisseur à la clef, et 16 mètres de tête en tête. On l'a établie en quatre parties éloignées de 1m,00 l'une de l'autre et des naissances; les cinq intervalles étaient occupés par des encaissements en bois situés aux naissances, aux reins et à la clef. Les quatre voussoirs ont d'abord été exécutés ensemble et sur une épaisseur de 1m,00 environ; puis on a enlevé les encaissements et on en a rempli simultanément tous les emplacements avec de la même maçonnerie que pour les voussoirs; on a ensuite complété l'épaisseur de la voûte. Par ce moyen, on a évité les ruptures qui ont ordinairement lieu aux naissances et vers les reins lors de l'exécution des voûtes, et on a obtenu une voûte composée en quelque sorte d'un seul voussoir. Lors du décintrement, il a été impossible de remarquer aucun abaissement à la clef, ni la plus légère fissure aux naissances et aux reins. Ce n'est qu'après le premier hiver que, par suite de la dilatation et de la contraction dues aux variations de température, on a remarqué un léger fendillement aux naissances.

Au *petit pont*, qui a les mêmes dimensions que le *pont aux Doubles*,

si ce n'est que son ouverture est de 32m,50 en aval et 31 mètres en amont, pour construire la voûte on a commencé par faire un premier rouleau sur tout le cintre avec des meulières piquées, en laissant un intervalle aux naissances et à la clef. Cette première assise étant posée, on l'a fermée aux naissances et à la clef. On a fait ensuite le complément de l'épaisseur de la voûte, en ne la fermant encore qu'en dernier lieu aux naissances et à la clef. Les parties apparentes sont en meulière piquée; sur les têtes, deux voussoirs forment l'épaisseur de la voûte. Au *pont aux Doubles*, toute la maçonnerie a été couverte de ciment de Vassy, dans lequel on a refouillé des joints pour imiter la pierre de taille. Les parapets de l'un et l'autre de ces ponts sont en belle pierre de taille, et leurs extrados sont, comme les douelles, des surfaces profilées par des arcs de cercle.

Décintrement des voûtes. Avant d'exposer quand et comment on doit effectuer le décintrement des voûtes, nous allons rappeler ce qui se pratiquait et ce qui se fait encore quelquefois en pareil cas.

Des constructeurs professent que la maçonnerie d'une voûte doit être laissée sur cintres un mois ou six semaines, c'est-à-dire jusqu'à ce que le mortier soit sec. Suivant le même système, on enlève successivement les couchis depuis les naissances jusqu'à la clef, en ruinant les cales qui séparent ces couchis des fermes. Quand cette manœuvre devient impraticable, à cause de la grande pression que supportent les derniers couchis, on affaiblit peu à peu, au ciseau, les abouts des arbalétriers, de manière à obtenir un tassement lent et progressif. Dans quelques circonstances, fort rares heureusement, on a ruiné les points d'appui mêmes des fermes, en décintrant ainsi brusquement.

D'autres constructeurs croient qu'il peut être bon d'opérer d'une manière diamétralement opposée.

D'abord il est prouvé maintenant, par de nombreux exemples, que, tant sous le rapport de la stabilité que sous celui du tassement, il n'y a aucun désavantage à décintrer les voûtes presque immédiatement après la pose des clefs; mais, d'un autre côté, sous le rapport des mouvements, imperceptibles ou non, qui s'accomplissent dans la voûte au moment du décintrement, il y a, on n'en saurait douter, tout avantage à ce qu'alors le mortier soit encore dans un état qui lui permette de se comprimer, de se mouler suivant de nouvelles figures, sans que sa désorganisation s'ensuive. Il semble donc qu'*il faut maçonner les voûtes et les décintrer le plus promptement qu'on pourra*, afin d'éviter qu'il n'y ait quelques portions de mortier complétement prises au moment du décintrement.

En second lieu, tout le monde reconnaît qu'il faut se garder de laisser prendre aux voûtes une certaine vitesse lorsqu'elles s'abaissent au décintrement. L'expérience prouve, en effet, que ces modifications d'équilibre dans les maçonneries, même leur écrasement, même leur

renversement, sont loin d'être instantanées, et demandent au contraire, pour s'accomplir, un temps appréciable. Il faut donc que le décintrement soit fait et dirigé de telle manière, que les cintres ne quittent la voûte que par progression insensible et en plusieurs phases, séparées par un intervalle de temps notable; il est bon même, en cas d'accident prévu, que ce décintrement puisse être arrêté à un instant donné, de telle sorte que la voûte se retrouve sur ses cintres, comme avant le commencement de l'opération. Or on peut atteindre ce but, en substituant au procédé de décintrement ci-dessus rappelé le suivant, qui est goûté par beaucoup de praticiens.

Chaque ferme du cintre n'étant maintenue qu'à ses deux extrémités par des coins doubles, à petit angle, on lui imprime un mouvement aussi modéré qu'on veut, soit d'abaissement vertical, soit d'écartement horizontal, en faisant glisser l'un sur l'autre les deux coins d'une même paire. Il suffit souvent, pour la manœuvre dont il s'agit, de placer à chaque pied de ferme un ouvrier, muni d'une cognée de charpentier ou d'un têtu de tailleur de pierre, qui frappe à petits coups sur le coin inférieur de la paire portant sur la semelle traînante. Quelquefois on éprouve de grandes difficultés pour faire glisser ce coin, à cause du poids considérable qui agit dessus; il arrive même assez souvent, lorsque ce coin est un peu desserré, que cette pression le lance avec force jusqu'au pied-droit opposé : les ouvriers doivent toujours se placer de manière que, ce cas arrivant, ils ne puissent être atteints. Le constructeur doit diriger l'opération et avoir l'œil sur les ouvriers, afin qu'ils agissent tous, autant que possible, d'une manière identique. Dans les premiers instants, et quoique l'abaissement des fermes soit accusé par le mouvement des coins, l'effet du décintrement de la voûte n'est pas visible, parce que tout l'espace rendu libre est successivement occupé en vertu de la réaction d'élasticité des bois, dont la compression décroît graduellement; en un mot, le cintre quitte la voûte comme un ressort qui se débande lentement. Lorsqu'une fois il s'est fait un jour continu entre l'intrados et la nappe des couchis, on peut enlever complétement les coins et ensuite les couchis; mais il vaut mieux différer d'un jour ou deux pour attendre les effets du tassement, lesquels peuvent très-bien ne se révéler qu'après ce délai.

Quelle que soit l'ouverture de la voûte, le mode de décintrement qu'on vient de décrire reste applicable.

Le système de coins a été remplacé avantageusement par plusieurs constructeurs français, pour des voûtes de ponts, par des sacs de forte toile remplis de sable bien tassé, et dont l'ouverture est cousue avec du fil très-fort ou seulement ficelée. Ces sacs se placent aux mêmes endroits que les coins dans le mode précédent, et ils résistent bien à l'effort considérable de compression auquel ils sont soumis. Quand on veut décintrer, on pratique une ouverture à l'extrémité de chacun des



sacs, lesquels se vident alors lentement, et on peut activer l'écoulement du sable en le remuant avec une tige de bois ou de fer. Ce moyen simple et économique, qui finira très-probablement par être généralement employé à l'exclusion des autres, fournit un décintrement facile, excessivement régulier, sans aucune secousse.

624. *Reconstruction du pont Notre-Dame, à Paris.* Cette reconstruction, qui s'est faite en quelques mois, a fixé l'attention de tout Paris et principalement des connaisseurs, tant par le mode que par la rapidité d'exécution; aussi fait-elle honneur aux ingénieurs MM. Michal et Darcel, ainsi qu'au constructeur M. Gariel.

Nous avons déjà exposé le mode de construction de la voûte de ce pont (623). Pour tracer le profil des voûtes qui a servi à découper les panneaux en volige nécessaires à la taille des voussoirs, on a tracé les ellipses d'intrados et d'extrados à l'aide d'une grande règle sur l'une des arêtes de laquelle, à partir d'un même point, on a porté le petit et le grand axe (*Int.* 892). Les axes des ellipses d'extrados et d'intrados coïncident; mais comme la longueur du grand axe de l'ellipse d'intrados n'était pas donnée, pour l'obtenir, du point fixé comme naissance de l'arc d'extrados, comme centre, avec un rayon égal au petit axe, on a décrit un arc de cercle coupant le grand axe en un point; on a joint par une droite ce point à celui de naissance de l'extrados, et la longueur de cette droite prolongée jusqu'à sa rencontre avec le petit axe a été la longueur du grand axe. Ayant les axes des ellipses on a déterminé les foyers (*Int.* 881).

On a pris pour directions des plans de joints des moyennes entre les normales aux courbes d'intrados et d'extrados, moyennes que l'on a obtenues assez exactement pour la pratique en menant les rayons vecteurs de l'ellipse d'intrados à des foyers fictifs également distants des foyers d'intrados et d'extrados, et en menant les bissectrices des angles formés par ces rayons vecteurs (*Int.* 895).

Ce qui suit est extrait du cahier des charges :

Dimensions. Le pont sera formé de 5 arches ayant $18^m,76$ de largeur sur $7^m,50$ de flèche pour celle du milieu; $18^m,20$ de largeur sur $7^m,39$ de flèche pour les voisines, et $17^m,67$ de largeur sur $7^m,28$ de flèche pour les arches extrêmes; de telle sorte que les naissances étant à $2^m,00$ en contre-haut de l'étiage amont du pont, fixé à la cote $75^m,45$; les clefs seront établies sur deux lignes inclinées à $0^m,005$ pour mètre à partir de celle de l'arche du milieu.

Chaque voûte aura $0^m,90$ d'épaisseur à la clef, et ira en s'élargissant de manière à avoir $1^m,40$ d'épaisseur à la rencontre de l'extrados avec le plan d'arasement des maçonneries de remplissage des piles, établi à la cote $68^m,25$.

L'extrados sera revêtu d'une chape en ciment, recouverte d'une seconde en bitume dans laquelle seront pris des tuyaux pour dégorger les eaux qui pourront s'infiltrer à travers la chaussée.

Les piles auront $3^m,50$ d'épaisseur aux naissances et un fruit de 1/35. Les becs seront demi-circulaires.

Les têtes des voûtes feront une saillie de $0^m,05$ sur les parements des tympans;

chaque assise sera marquée par des refends de $0^m,05$ de largeur et autant de profondeur ; il en sera de même des maçonneries de pierre de taille des becs. Les maçonneries des têtes formeront également une saillie de $0^m,05$ sur la douelle de la voûte, avec laquelle elles se relieront par un appareil de carreaux et boutisses ayant alternativement $0^m,80$ et $1^m,10$ de longueur.

Les tympans, de $1^m,00$ d'épaisseur, seront arasés suivant les lignes formées par le sommet de l'extrados des voûtes; ils présenteront au-dessus de chaque pile un pilastre formant saillie de $0^m,15$ sur le parement général.

Les parapets auront $0^m,80$ de hauteur extérieurement, et $1^m,00$ du côté des trottoirs; leur épaisseur sera de $0^m,50$; ils seront posés à l'aplomb des tympans.

L'axe de la chaussée suivra, à partir de l'axe des quais de la rive droite, placés à la cote $64^m,70$, une rampe de $0^m,005$ par mètre, jusqu'au sommet de l'arche du milieu, de ce point, il s'abaissera par une pente également de $0^m,005$ par mètre jusqu'aux quais de la rive gauche.

Le profil en travers présentera une chaussée de $12^m,00$ de largeur, bombée au 1/80, et bordée de deux trottoirs de $5^m,00$ de largeur, ayant une pente de $0^m,03$ par mètre dirigée du côté de la chaussée. Ils seront terminés par une bordure formant saillie de $0^m,15$ sur cette dernière. La chaussée aura $0^m,30$ d'épaisseur.

Il y aura deux galeries sous chaque trottoir pour le passage des conduites d'eau et de gaz; elles auront chacune $1^m,00$ de hauteur sous le dallage de $0^m,15$ d'épaisseur, et $1^m,20$ de largeur. Ces galeries présenteront les mêmes pentes que la chaussée; elles seront prises en partie dans l'épaisseur des voûtes.

Matériaux. Les avants-becs, les têtes des voûtes, les corniches et les parapets seront en maçonnerie de pierre de taille de Bourgogne; les pilastres des tympans, en pierre de taille de Vergelet; les douelles des voûtes, en moellon piqué de roche hourdé en mortier de ciment; les tympans, en moellon piqué de roche et mortier de chaux hydraulique; la maçonnerie de remplissage des voûtes, en moellon hourdé en mortier de ciment; la maçonnerie de remplissage des tympans et celles des galeries de conduites, en moellon et mortier de chaux hydraulique; les remplissages entre les voûtes et la chaussée, en maçonnerie de pierre sèche. Les trottoirs seront en dalles de granit, avec bordure également en granit.

Cintres. Les cintres en charpente devront servir à la démolition et à la reconstruction; ils seront composés, pour chaque arche, de 13 fermes espacées de 2 mètres d'axe en axe pour les 11 du milieu, et de $1^m,25$ pour les deux têtes, de manière à obtenir une largeur totale de $22^m,75$ entre les faces des deux fermes de tête.

Chaque ferme sera formée de deux systèmes de courbes, dont le cours supérieur sera, pour la démolition, parallèle à l'intrados des voûtes et distant de $0^m,20$ de ce dernier, de manière qu'on puisse facilement introduire les couchis de $0^m,12$ d'équarrissage, et les serrer fortement au moyen de cales contre les maçonneries des voûtes. Le cours inférieur des courbes sera au contraire parallèle à la douelle des nouvelles voûtes, et il en sera distant de $0^m,12$ pour les neuf fermes du milieu, et de $0^m,17$ pour les deux d'amont et les deux d'aval. La maçonnerie en pierre de taille des têtes, et celle en moellon piqué des voûtes, en retraite de $0^m,05$ sur la première, s'appuieront ainsi directement sur les couchis de $0^m,12$ d'équarrissage et espacés de $0^m,12$. Il y aura trois cours de couchis : 1° ceux s'appuyant sur les deux fermes de tête amont ; 2° ceux supportés par les 11 fermes du milieu ; ceux-ci passeront, sur la deuxième ferme, dans les interstices laissés par les couchis du premier cours, et seront maintenus au moyen de cales de $0^m,05$ d'épaisseur sur la courbe de la deuxième ferme ; 3° ceux des deux fermes aval, disposés symétriquement comme ceux des deux fermes amont.

Les courbes seront supportées, pour les quatre arches du côté de la rive droite, par un système de charpente de cintre, dit fixe, établi à deux étages, de manière à pouvoir décintrer les arches, lors même que les eaux seraient élevées. Ces cintres s'appuieront sur trois palées, l'une établie dans l'axe de l'arche, et les deux autres

sur les crèches des piles. Le cintre de l'arche de la rive gauche sera retroussé de manière à entraver le moins possible la navigation.

Lieux d'extraction, qualités et préparation des matériaux.

1° La *pierre de taille* à employer proviendra en partie des démolitions du pont actuel ; il ne sera employé de pierre de taille neuve qu'autant que toute la vieille pierre bonne à réemployer en assises aura été utilisée.

La pierre de taille neuve sera de la qualité dite de roche (507), et proviendra, suivant les indications données à l'entrepreneur, des meilleurs bancs des carrières de Bagneux, près Paris, du banc gris de la carrière de Pierrechèvre, près Châtillon-sur-Seine, et du banc jaune de la carrière de Chevroche, près Clamecy. Elle sera sans veines, fils, moies ni bousin ; les arêtes seront vives, dressées avec le plus grand soin, sans épaufrures ni écornures.

Tous les lits et joints devront se retourner bien francs, sans démaigrissement sur les longueur et largeur assignées à chaque pierre ; ils seront d'équerre ou suivant l'angle assigné sur les parements, dégauchis et taillés sur toute leur étendue.

Le parement vu sera layé avec le plus grand soin entre ciselures de 0m,015 pour la pierre de Bagneux, et bouchardé à la fine boucharde entre ciselures de 0m,015 pour la pierre de Bourgogne.

Chaque pierre pour assise du bahut, du parapet ou pour le cordon, aura au moins 1m,50 de longueur ; les pierres pour le parpaing auront 1m,30 ; les claveaux des voûtes seront d'une seule pierre, les lits correspondant aux refends ; les carreaux et boutisses des chaînes seront également d'une seule pierre.

2° Les *granits* proviendront des carrières les plus dures de la Normandie et de la Bretagne, à l'exclusion de celles de la Bourgogne et du Nivernais (509). Ils seront à grains fins bien adhérents, et devront peser au moins 2700 kilog. le mètre cube. Aucun bloc ne devra contenir de fentes, ni de parties tendres et rouillées.

Les parements seront parfaitement dressés à la fine pointe, entre ciselures de 0m,015 aux arêtes ; ces arêtes seront droites sans écornures. Chaque bordure des trottoirs aura au moins 1m,30 de longueur. La largeur des dalles variera de 0m,50 à 0m,60.

3° Le *moellon* proviendra en partie des démolitions, ou du cassage de la vieille pierre de taille ne pouvant être utilisée comme assise (545).

Le moellon neuf à employer sera de roche, et proviendra des carrières de Vaugirard ou des environs ; il sera dur, rocailleux et parfaitement ébousiné ; chaque moellon ne pourra avoir moins de 0m,25 dans sa plus petite dimension.

4° Les *moellons piqués* proviendront du cassage de la pierre de taille de démolition (545). Chaque morceau sera taillé sur appareil régulier, de manière à ce que deux assises de moellon correspondent à une de pierre de taille. Chaque morceau aura au moins 0m,60 de longueur, et la queue variera de 0m,40 à 0m,60, de manière à former une queue moyenne de 0m,50.

Les parements seront taillés à la grosse brettelure entre ciselures de 0m,015. Les joints retourneront normalement, et les lits sur l'inclinaison assignée ; ils seront taillés sans démaigrissement, avec les mêmes soins que pour la pierre de taille, sur 0m,25 de longueur.

5° La *meulière* sera de deux natures (509 et 546) : celle pour parements de quais à reconstruire proviendra de Buch ; celle pour maçonnerie de remplissage et parements d'égouts proviendra de Villeneuve-Saint-Georges, Corbeil et autres localités de la haute Seine.

La meulière de Buch, piquée en carrière, sera taillée sur le chantier avec les mêmes soins que la pierre de taille. Les lits et joints étant bien dressés et retournés d'équerre sur 0m,15 au moins de longueur, les arêtes seront parfaitement droites et vives sans écornures. Les pierres auront au moins 0m,16 de hauteur, 0m,20 de queue et 0m,25 de longueur ; la queue moyenne devra être de 0m,30.

La meulière de la haute Seine à employer en parement dans les égouts sera dégrossie à la grosse pointe et parfaitement smillée, les lits et joints étant dressés et

retournés d'équerre sur au moins 0m,12 de longueur. Chaque pierre aura au moins 0m,10 de hauteur d'assise et 0m,25 de queue.

6° Le *sable* sera sec et anguleux (530), criant à la main, sans mélange de vase ou gravier. Il proviendra de dragages faits en Seine; celui devant servir à la pose de la pierre de taille sera en outre tamisé avec soin.

7° Il ne pourra être employé que de la *chaux* hydraulique artificielle *dite de Paris* (522). L'hydrate déposé sous l'eau devra supporter l'aiguille Vicat au bout de 9 jours (520).

La chaux, déposée vive sur les chantiers, sera éteinte dans des bassins ayant au plus 0m,50 de hauteur; on n'emploiera, pour l'extinction, que la quantité d'eau nécessaire pour la réduire en pâte ferme et consistante; elle sera éteinte au moins 48 heures avant la fabrication des mortiers. Les hydrates qui auraient durci avant leur emploi, ou qui contiendraient des parties lentes, mal éteintes, ou des incuits, seront rejetés.

8° Le *mortier* sera composé de 0m,33 de chaux en pâte pour 1m,00 de sable (530). Le dosage se fera dans les bassins d'extinction, de forme rectangulaire à plancher horizontal, ou par toute autre méthode prescrite par l'ingénieur.

Le mortier sera fabriqué à force de bras, avec des rabots. On commencera par réduire, sans addition d'eau, la chaux en bouillie par la macération; on incorporera ensuite le sable par parties, et le mélange sera brassé jusqu'à ce que la pâte soit liante et ductile.

Le mortier sera employé immédiatement après sa fabrication; celui qui aurait durci sur l'aire serait rejeté.

9° Le *béton* sera composé de 3 parties de mortier pour 5 parties de pierres cassées ou de gravier (534); chaque pierre devra passer au travers d'un anneau de 0m,06 de diamètre, et avoir plus de 0m,02 dans sa plus petite dimension; les pierrailles seront lavées avant leur emploi.

10° *Le ciment* proviendra des usines de Vassy (529). Il sera ou conservé dans des futailles à l'abri de la pluie et de l'humidité, ou en tas sous des hangars clos très-hermétiquement. Dans ce dernier cas, le ciment arrivera directement de l'usine par chemin de fer, dans des sacs en toile.

Le ciment ne sera incorporé aux mortiers et bétons qu'après le complet corroyage de ces derniers et au moment de l'emploi.

Le mortier de ciment sera composé suivant les indications de la série des prix. Le dosage des parties composantes se fera au volume. Le mortier sera gâché dans des auges, par parties et avec la plus petite quantité d'eau possible. Celui qui s'échaufferait avant l'emploi sera rejeté.

11° Tous les *bois en charpente pour fondations* seront en chêne neuf de premier choix, sans pourriture, ni nœuds vicieux; ils ne seront point échauffés, gras, gélifs, ni tranchés dans leurs fils.

Les pieux seront en grume ou carrés, suivant les ordres qui seront donnés à l'entrepreneur; ils seront parfaitement droits, et ne pourront avoir de flache de plus de 0m,10, mesurée sur le pan coupé s'ils sont carrés; s'ils sont ronds, ils seront dégarnis de leur écorce, et les nœuds seront proprement coupés à la cognée. L'équarrissage moyen des pieux ne pourra dépasser les dimensions indiquées à l'entrepreneur; mais il sera toléré sur chaque pieu 3 centimètres en plus ou en moins desdites dimensions.

Les pieux seront armés d'un sabot en fer fixé avec des clous, et ils seront disposés pour recevoir une frette en fer.

Les palplanches, comme les pieux, seront d'un bout appointées et armées d'un sabot en fer, et de l'autre disposées pour recevoir une frette; leurs bords seront sans flaches et dressés à la bisaigue. La différence de largeur d'une même palplanche, à ses deux extrémités, ne pourra excéder 3 centimètres.

Les moises, ventrières, chapeaux ou longrines de plancher ne seront pas refaites sur les faces: cependant elles seront parfaitement droites et équarries, et il ne sera



souffert aucune flache de plus de 0m,05, mesurée sur le pan coupé. Chaque pièce de bois devra relier au moins trois pieux, et ne pourra s'assembler à la suivante dans l'intervalle; les joints de deux pieces voisines ne pourront correspondre au même pieu.

Les *bois pour charpentes provisoires* seront en chêne ou en sapin, suivant les ordres donnés à l'entrepreneur. Ils seront parfaitement travaillés et ne pourront avoir de flaches de plus de 0m,05, mesurées sur le pan coupé. Les chapeaux, les moises et les contre-fiches seront d'une seule pièce dans toute leur longueur.

12° La *fonte* sera douce, grise et parfaitement moulée, sans soufflures ni foutes de retrait.

Le *fer* sera de qualité dite de roche; il ne sera ni aigre ni cassant, mais nerveux et malléable; il sera travaillé sans brûlures, pailles ni gerçures.

13° Le *bitume* des chapes et trottoirs sera composé de roche calcaire asphaltique de Seyssel ou de Val-de-Travers (*Art.* 71), réduite en poudre par une demi-calcination, et de malte ou goudron minéral de Bastennes ou de Lobsann. Ces matières seront composées, pour les chapes, d'une partie de sable de rivière passé à la claie et de trois parties de matières asphaltiques, et pour les trottoirs, de trois parties de mastic pour deux de sable.

Dans le bitume en réfection, l'entrepreneur ajoutera les matières qu'exigera le réemploi des vieux enduits.

Les chapes auront 0m,012 d'épaisseur et les trottoirs 0m,015.

625. *Murs de soutènement.* L'épaisseur à donner à ces murs varie selon la poussée des terres à soutenir, poussée qui dépend de l'inclinaison du talus affecté par ces terres lorsqu'elles sont abandonnées à elles-mêmes.

Supposons, figure 32, planche III, que les terres à soutenir aient *ce* pour talus naturel. Supposant que le prisme *bce* soit d'un seul morceau, il se maintiendra en équilibre sans exercer aucune poussée sur le mur *abcd;* mais si nous considérons un prisme *bcf*, il est évident qu'il exercera contre le mur une poussée due à son poids, et diminuée par le frottement des terres sur le talus *cf* et par la cohésion (cette cohésion peut être considérée comme nulle pour les terres remuées, comme le sont généralement celles que l'on rapporte derrière les murs de soutènement, et nous allons d'abord la supposer telle dans ce qui suit); si maintenant nous considérons un prisme très-mince le long du parement *cb*, il est évident qu'il exercera contre le mur une poussée moindre que celle du prisme *bcf*. Il existe donc, entre le prisme qui s'applique sur le talus *ce* et le prisme infiniment mince pris contre le parement *cb*, un prisme qui doit exercer une plus grande poussée que tous les autres que l'on peut considérer entre ces deux limites.

On prouve facilement, mais par des calculs assez longs et que nous ne pouvons rapporter ici, que le prisme de plus grande poussée est déterminé par la bissectrice de l'angle formé par la verticale *cb* et le talus naturel *ce*.

Supposant l'angle $bcf = \frac{1}{2}\alpha$, le prisme *bcf* est celui de plus grande poussée, et on a

$$Q = \frac{\delta h^2}{2} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha. \qquad (a)$$

Q poussée des terres contre le parement vertical bc;
δ poids du mètre cube de terre;
h hauteur bc des terres derrière le mur;
α angle de la verticale bc avec le talus naturel ce.

Dans le cas où le frottement et la cohésion sont nuls, ce qui a lieu pour les liquides, l'angle α est droit, on a $\operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha = 1$, et, par suite,

$$Q = \frac{\delta h^2}{2}.$$

Il s'agit de déterminer le point d'application de la poussée totale Q. Comme on démontre que cette poussée totale sur le parement du mur peut être représentée par la surface d'un triangle dont la hauteur est h, et dont la base et les parallèles à cette base représentent les pressions au pied du mur et sur les divers points respectifs de la hauteur de son parement, il en résulte que la résultante Q de toutes les pressions est appliquée au centre de gravité du triangle, c'est-à-dire à $1/3$ de h à partir du pied c du mur (*Int.*, 1091).

Il y aura équilibre statique quand le moment de la force Q, pris par rapport à l'arête extérieure du mur, sera égal au moment du poids du mur, pris par rapport à cette arête, c'est-à-dire quand on aura

$$\frac{\delta h^3}{6} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha = \delta' \left[\frac{nh^2}{2} \times \frac{2nh}{3} + hx\left(nh + \frac{x}{2}\right) + \frac{n'h^2}{2}\left(nh + x + \frac{1}{3} n'h\right) \right]; \quad (b)$$

équation du second degré qui donne la valeur de x, laquelle est, en simplifiant,

$$x = h\left[-\left(n + \frac{n'}{2}\right) \pm \sqrt{\frac{\delta}{3\delta'} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha + \frac{n^2}{3} - \frac{n'^2}{12}} \right].$$

δ' poids du mètre cube de maçonnerie;
n fruit du parement extérieur par mètre de hauteur du mur;
$\delta' \frac{nh^2}{2} \times \frac{2nh}{3}$ moment du massif formant le fruit du parement extérieur;
x largeur du mur à sa partie supérieure;
$\delta' hx \left(nh + \frac{x}{2}\right)$ moment du massif de mur compris entre ceux qui forment les fruits;
n' fruit, par mètre, du parement intérieur du mur;
$\delta' \frac{n'h^2}{2} \left(nh + x + \frac{1}{3} n'h\right)$ moment du massif de maçonnerie formant le fruit du parement intérieur.

Nous avons négligé le prisme de terre compris entre le parement in-

térieur et la verticale passant par le pied du mur; mais comme le parement intérieur se fait par retraites horizontales, ce prisme de terre ajoute, par son poids, à la stabilité du mur au lieu d'y nuire.

Lorsque les parements du mur sont verticaux, les valeurs de n et n' sont nulles, et la formule précédente devient

$$x = h \operatorname{tang} \frac{1}{2}\alpha \sqrt{\frac{\delta}{3\delta'}}.$$

Lorsque le mur résiste à un fluide, on a $\operatorname{tang} \frac{1}{2}\alpha = 1$, et, par suite,

$$x = h \sqrt{\frac{\delta}{3\delta'}}.$$

Si le prisme de plus grande poussée était chargé d'un cavalier, à $\frac{\delta h^2}{2}$ il faudrait ajouter ph dans la valeur de Q (p poids du cavalier sur l'unité de surface du terrain), de sorte que le moment de cette poussée deviendrait

$$\frac{h^2}{6} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha (\delta h + 2p),$$

et la formule (b) donnerait

$$x = h\left[-\left(n + \frac{n'}{2}\right) \pm \sqrt{\frac{\operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha}{3\delta'}\left(\delta + \frac{2p}{h}\right) + \frac{n^2}{3} - \frac{n'^2}{12}}\right].$$

Le mur doit pouvoir résister non-seulement au renversement, mais aussi au glissement sur sa base; il faut donc que la poussée Q des terres soit moindre que le frottement de glissement augmenté de la cohésion entre le mur et sa base, et que par conséquent, pour l'équilibre statique, on ait

$$\frac{\delta h^2}{2} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha = k\delta'\left(\frac{nh^2}{2} + hx + \frac{n'h^2}{2}\right) + c(nh + x + n'h),$$

d'où on tire

$$x = \frac{h^2}{2} \times \frac{\delta \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha - (n + n')\left(k\delta' + \frac{2c}{h}\right)}{k\delta' h + c}.$$

Les valeurs de δ et de δ' sont données au n° 45;

Quant à la valeur de l'angle α, sous lequel les terres coulantes s'éboulent, il convient de la déterminer directement, en creusant la terre. Pour le sable fin très-sec, on a $\alpha = 60°$; pour la terre sèche et pulvérisée, $\alpha = 46°,50$; pour la terre humectée, $\alpha = 54°$, et pour les terres les plus fortes et les plus denses, $\alpha = 35°$;

k coefficient du frottement du mur sur sa base. Si le mur est établi sur une

couche de béton, on a $k = 0{,}76$; s'il repose sur le sol naturel (terre ou sable), $k = 0{,}57$ d'après des observations de M. Mary; sur rocher, on aurait, comme pour la maçonnerie, $k = 0{,}76$; pour un fond argileux sujet à être détrempé, on ferait $k = 0{,}30$ environ.

c cohésion du mur sur sa base par mètre carré de cette base. Si le mur repose sur béton, $c = 10\,000$ à $144\,000$, selon que le mortier employé est de médiocre ou d'excellente qualité; la maçonnerie n'ayant aucune cohésion avec un sol de terre ou de sable, on doit faire $c = 0$ dans la formule quand le mur repose directement sur le sol.

Quand le mur descend au-dessous du sol sur les deux faces, comme cela a généralement lieu, on conçoit que la butée des terres contre la seconde face s'oppose au renversement et au glissement. On calculera cette butée à l'aide de la formule (*a*), dans laquelle on remplacera la hauteur h, comptée depuis le pied de la fondation, par la profondeur h_1 de la fondation, et la différence entre les valeurs des moments de Q et Q′ pris par rapport au pied de la fondation du mur, formera le premier membre de la formule (*b*), qui fournira encore l'épaisseur x. Le frottement du mur sur sa base devra encore être supérieur à $Q - Q'$. Il y aurait lieu encore de tenir compte du frottement des terres, frottement qui s'ajoute à Q′ pour s'opposer au mouvement du mur (629).

Quand les terres ont de la cohésion, la valeur de la poussée horizontale est

$$Q = \frac{\delta h}{2} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha \, (h - h').$$

h' profondeur à laquelle on a creusé les terres à pic avant leur éboulement, la surface des terres ayant été dressée horizontalement.

On déterminerait l'épaisseur à donner au mur pour résister à cette valeur de Q, de la même manière que quand la cohésion est nulle; il suffirait de remplacer dans les formules précédentes la valeur de Q (formule (*a*)) par cette nouvelle.

Toutes les formules précédentes fournissent l'épaisseur à donner au mur pour qu'il y ait équilibre statique; mais il est évident que cette épaisseur ne suffit pas dans la pratique, et qu'on doit l'augmenter, pour obtenir une stabilité convenable, d'une quantité qui dépend de la nature de la fondation sur laquelle repose le mur; car l'arête autour de laquelle le mur tend à tourner s'enfonce avec d'autant moins de peine, et le renversement est d'autant plus facile, que la fondation est plus compressible. Il conviendrait, par des observations sur les constructions existantes, ou par des expériences directes, de déterminer le coefficient par lequel il faut multiplier le moment d'équilibre statique du mur, pour avoir une stabilité convenable pour chaque nature de fondation. D'après Gauthey, les dimensions calculées à l'aide des formules précédentes, où on a fait abstraction de la cohésion des terres, peuvent être adoptées avec confiance dans la pratique, surtout si on exécute les

remblais derrière les murs à mesure qu'on les élève, afin de donner aux terres le temps de se tasser et d'adhérer entre elles. Mais ces formules supposent que la base sur laquelle le mur est élevé est incompressible, et comme le défaut de soin et de précaution dans la fondation est une des causes les plus fréquentes de la destruction des murs de revêtement, et que la moindre inégalité dans le tassement peut faire sortir le mur de son aplomb, il convient presque toujours d'ajouter quelque chose à l'épaisseur donnée par les formules, et d'avoir égard à la nature de la fondation et à son degré de compressibilité pour fixer la largeur de l'empatement sur lequel le mur est établi.

Lorsque le mur est établi sur un sol très-mauvais, il convient que le moment de stabilité du mur, pris par rapport à la ligne passant par le milieu de la base du mur, fasse équilibre au moment de la poussée des terres; car alors le mur pressant également en tous les points de sa base, le tassement est aussi uniforme que possible; on obtient cette disposition en donnant un grand fruit au parement extérieur.

Pour apprécier, en général, l'augmentation à donner à un mur de soutenement au delà de l'épaisseur statique, M. Mary a imaginé de tracer sur le profil du mur la courbe des pressions, comme on le fait pour les voûtes (618); on voit ainsi en quel point et sous quel angle cette courbe vient couper la fondation. Dans le cas du renversement, on calcule la surépaisseur de manière que la partie de la fondation qui y correspond ne s'affaisse pas ou ne s'écrase pas sous le poids des 2/3 de la charge.

La courbe se détermine en divisant le mur en tranches verticales triangulaires ou rectangulaires, de manière à éviter la recherche des centres de gravités de figures polygonales, et en composant la poussée des terres ou de l'eau avec le poids de la première tranche; cette première résultante se compose elle-même avec le poids de la deuxième tranche, et ainsi de suite.

Afin d'augmenter le moment de stabilité du mur, on construit souvent des contre-forts sur le parement intérieur; ces contre-forts ont encore l'avantage de diviser le prisme de plus grande poussée.

Lorsque les contre forts font partie du mur, pour déterminer l'épaisseur de ce mur, on calcule isolément le moment de stabilité de la partie de mur qui correspond à un contre-fort, en considérant le contre-fort comme faisant partie du mur, et celui de la partie comprise entre deux contre-forts; on ajoute ces deux moments, et on égale leur somme au moment de la poussée calculée pour la longueur de prisme correspondant à l'intervalle compris entre deux contre-forts.

Lorsque l'on fait des contre-forts indépendants, comme ceux en pierre sèche, on calcule le moment de stabilité comme dans le cas précédent, mais sans avoir égard aux contre-forts, et on l'égale au moment de la poussée pris pour l'intervalle renfermé entre deux contre-forts.

Pour que ce mode de calcul soit exact, les contre-forts doivent être assez longs pour atteindre la limite du prisme de plus grande poussée; dans le cas contraire, on tiendrait compte de la poussée produite contre le contre-fort par la portion non atteinte de ce prisme.

Les contre-forts isolés n'ayant pour objet que de rompre le prisme de plus grande poussée, ils sont ordinairement employés dans les lieux où la pierre est très-abondante, et on les exécute en pierres sèches. C'est ce qui a été fait très-judicieusement dans diverses circonstances sur le chemin de Saint-Germain, où l'on avait en abondance des mauvais moellons provenant des déblais et ne pouvant servir qu'à faire des remblais et des contre-forts abrités de la gelée.

Le mur de quai de Châlons, construit par Gauthey, a 5 à 6 mètres de hauteur; il a $0^m,65$ d'épaisseur en haut et $1^m,15$ en bas, avec 1/12 de fruit sur le parement vu. Les contre-forts ont 1 mètre d'épaisseur et autant de saillie; ils sont distants de $5^m,30$ d'axe en axe; ils sont reliés par 3 étages de voûtes en décharge de $1^m,60$ de hauteur sous clef. Par cette disposition on a économisé 1/3 de la maçonnerie.

Dans les quais de Paris, on a rattaché aux murs des contre-forts distants de 6 mètres, ayant $2^m,20$ de longueur et $1^m,20$ à $1^m,50$ de largeur. Ils supportent des trottoirs qui ont 3 mètres; le parapet a $0^m,50$; mais on ne les a reliés que par une seule voûte placée à la partie supérieure. Cette disposition exige plus de maçonnerie que celle de Gauthey; mais elle diminue les frais de construction de voûtes. Un motif indépendant de l'économie aurait dû engager à adopter ce système, c'est la facilité qu'il présente d'établir solidement les trottoirs sur les voûtes en décharge. Sur plusieurs quais de Paris, établis dans un autre système, il y a pendant longtemps des tassements dans les terres rapportées derrière les murs; de sorte que si on y établissait des trottoirs ils seraient continuellement dégradés pendant un grand nombre d'années par l'effet du tassement (*Art.* 214).

626. *Murs de revêtement.* D'après Vauban, les profils des murs de rempart sont convenables lorsque le moment de la résistance est des 4/3 plus fort que celui de la poussée des terres. C'est pour cette résistance que M. Poncelet a donné la formule empirique suivante pour calculer l'épaisseur des revêtements pleins à parements verticaux,

$$x = 0,845\,(H + h)\,\text{tang}\,\frac{1}{2}\,\alpha\sqrt{\frac{\delta}{\delta''}}$$

qui devient, pour le cas des maçonneries moyennes,

$$x = 0,285\,(H + h).$$

x épaisseur du mur;
H hauteur du revêtement;

h hauteur entière de la surcharge ;
α angle du talus naturel des terres avec la verticale ;
δ poids du mètre cube de terre ;
δ' poids du mètre cube de maçonnerie.

Ces formules sont applicables dans les limites de $h = 0$ et $h = H$, qui correspondent aux surcharges ordinaires de la pratique.

Si le parement extérieur, au lieu d'être vertical, avait une inclinaison moindre que 1/6, on prendrait l'épaisseur déduite de la formule précédente pour celle du revêtement cherché, mesurée à 1/9 de la hauteur à partir de la base. Cette règle est fondée sur le principe suivant :

Principe général de transformation d'un profil en un autre, d'après Vauban. Tous les profils de revêtements à parement intérieur vertical, de même hauteur et même stabilité, mais dont les parements extérieurs sont inclinés à moins de 1/6 sur la verticale, ont, à 1/120 près, la même épaisseur au 1/9 de leur hauteur à partir de la base ; d'où il résulte que jusqu'à cette limite, pour transformer un profil en un autre, il suffit de faire tourner le parement extérieur donné autour d'une horizontale comme axe, jusqu'à ce qu'il ait l'inclinaison voulue, cette horizontale étant tracée dans le parement donné, et au 1/9 de sa hauteur.

Lorsque l'inclinaison du talus extérieur varie de 0 à 1/5, la même égalité a encore lieu, mais seulement à 1/71 près.

Table donnant les épaisseurs x des revêtements pour les diverses terres et maçonneries, avec ou sans berme, et pour des hauteurs de surcharges qui dépassent les limites ordinaires de la pratique; ces épaisseurs étant calculées en prenant la hauteur H des revêtements verticaux pour unité, et dans l'hypothèse de la rotation, et d'une stabilité équivalente à celle du revêtement modèle de Vauban, sans contre-forts.

Les lettres x, H, h, δ et δ' ont les mêmes significations que dans les formules précédentes, et $f = \tang \alpha$; f varie de 0,6 à 1,4, suivant que les terres sont légères ou très-fortes, et $f = 1$ pour les terres moyennes pour lesquelles $\alpha = 45°$ (625).

VALEUR de $\frac{h}{H}$	VALEUR DE x pour $\frac{\delta'}{\delta}=1$, $f=0.6$, la berme étant		VALEUR DE x pour $\frac{\delta'}{\delta}=1$, $f=1.4$, la berme étant		VALEUR DE x pour $\frac{\delta'}{\delta}=1.5$, $f=1$, la berme étant			VALEUR DE x pour $\frac{\delta'}{\delta}=\frac{5}{3}$, $f=0.0$, la berme étant		VALEUR DE x pour $\frac{\delta'}{\delta}=\frac{5}{3}$, $f=1.4$, la berme étant	
	nulle.	0.2H	nulle.	0.2H	nulle.	0.2H	totale.	nulle.	0.2H	nulle.	0.2H
0.0	0.452	0.452	0.258	0.258	0.270	0.270	0.270	0.350	0.350	0.198	0.198
0.1	0.498	0.507	0.282	0.290	0.303	0.306	0.303	0.393	0.398	0.222	0.229
0.2	0.548	0.563	0.309	0.320	0.336	0.342	0.320	0.439	0.445	0.249	0.202
0.3	0.004	0.018	0.338	0.361	0.368	0.375	0.343	0.485	0.489	0.274	0.283
0.4	0.065	0.070	0.369	0.394	0.399	0.405	0.357	0.532	0.522	0.303	0.299
0.5	0.726	0.717	0.402	0.423	0.436	0.431	0.308	0.579	0.549	0.332	0.314
0.0	0.776	0.754	0.430	0.450	0.477	0.457	0.377	0.017	0.572	0.360	0.328
0.7	0.824	0.790	0.472	0.470	0.512	0.481	0.385	0.645	0.593	0.387	0.343
0.8	0.867	0.820	0.510	0.501	0.544	0.504	0.391	0.008	0.610	0.413	0.357
0.9	0.903	0.848	0.541	0.524	0.575	0.523	0.398	0.690	0.024	0.437	0.371
1.0	0.930	0.873	0.571	0.546	0.005	0.540	0.405	0.707	0.030	0.45[illegible]	0.384
1.2	0.983	0.916	0.632	0.580	0.654	0.574	0.411	0.737	0.655	0.498	0.410
1.4	1.023	0.945	0.084	0.024	0.696	0.602	0.416	0.702	0.672	0.537	0.428
1.0	1.056	0.970	0.730	0.058	0.734	0.622	0.420	0.780	0.085	0.500	0.445
1.8	1.084	0.990	0.772	0.690	0.709	0.040	0.423	0.797	0.097	0.594	0.461
2.0	1.107	1.004	0.812	0.714	0.795	0.055	0.425	0.811	0.705	0.022	0.475
2.5	1.151	1.037	0.902	0.778	0.848	0.090	0.431	0.833	0.722	0.680	0.506
3.0	1.180	1.060	0.981	0.835	0.892	0.717	0.435	0.852	0.731	0.720	0.531
3.5	1.203	1.074	1.047	0.883	0.928	0.738	0.438	0.802	0.737	0.705	0.551
4.0	1.222	1.084	1.105	0.920	0.957	0.755	0.442	0.872	0.742	0.800	0.568
4.5	1.237	1.093	1.158	0.902	0.981	0.708	0.444	0.878	0.747	0.833	0.583
5.0	1.247	1.101	1.200	0.994	1.002	0.779	0.445	0.883	0.751	0.802	0.596
5.5	1.254	1.109	1.250	1.021	1.019	0.788	0.447	0.880	0.756	0.[illegible]85	0.607
6.0	1.259	1.110	1.290	1.047	1.034	0.706	0.448	0.891	0.759	0.903	0.017
7.0	1.269	1.122	1.357	1.087	1.059	0.811	0.449	0.898	0.764	0.941	0.633
8.0	1.270	1.128	1.415	1.121	1.079	0.822	0.451	0.903	0.768	0.908	0.640
9.0	1.280	1.133	1.405	1.153	1.095	0.830	0.452	0.900	0.770	0.992	0.057
10.0	1.283	1.137	1.508	1.182	1.109	0.839	0.452	0.909	0.771	1.013	0.007
15.0	1.298	1.150	1.002	1.271	1.14[illegible]	0.864	0.455	0.917	0.777	1.088	0.090
20.0	1.309	1.156	1.757	1.327	1.171	0.878	0.456	0.922	0.780	1.129	0.712
25.0	1.312	1.100	1.821	1.363	1.185	0.887	0.457	0.924	0.782	1.140	0.723
30.0	1.310	1.162	1.860	1.389	1.194	0.894	0.458	0.926	0.763	1.174	0.730
Infini.	1.337	1.176	1.144	1.541	1.243	0.927	0.401	0.934	0.789	1.279	0.769

Application. Quelle doit être l'épaisseur d'un mur de quai de 7 mètres de hauteur, le poids du mètre cube de terre et de maçonnerie étant respectivement 1500 à 2250 kilog., et $\alpha = 45°$, ou $f = \text{tang}\ \alpha = 1$?

Ayant $\frac{h}{H} = \frac{0}{7} = 0$, et $\frac{\delta'}{\delta} = \frac{2250}{1500} = 1{,}5$, le tableau donne $x = 0{,}270$. L'épaisseur du mur en mètres sera alors

$$0{,}270 \times 7 = 1^m{,}89.$$

Si les valeurs de f et de $\frac{\delta'}{\delta}$ différaient notablement de celles de la table, on prendrait pour x une valeur proportionnelle entre celles de la table qui correspondent aux nombres les plus rapprochés des données.

627. *Épaisseur des batardeaux en maçonnerie.* Cette épaisseur se calcule par une formule semblable à celle qui donne l'épaisseur d'un mur de revêtement (626); ainsi on a, en remarquant que dans ce cas h est négatif, et que $\delta = 1000$ kilog.

$$x = 0{,}843\,(H - h)\sqrt{\frac{1000}{\delta'}}.$$

Comme au devant des barrages de rivières et de cours d'eau naturels il peut se former des atterrissements dont la poussée est plus grande que celle de l'eau, il faudrait, dans ce cas, faire $\delta = 1800^k$, qui est le poids moyen des terres mouillées (550).

628. *Épaisseur des murs en pierres sèches.* On prend ordinairement pour cette épaisseur 1/4 en sus de celle que donneraient les formules précédentes pour un revêtement en maçonnerie de même hauteur et placé dans les mêmes circonstances.

629. F étant l'excès de la poussée Q sur le frottement, le tout calculé au niveau du sol, on donne, pour déterminer la profondeur h_1 à laquelle il faut descendre la fondation pour résister avec sécurité au glissement, la formule

$$h_1 = 1{,}4\ \text{tang}\ \frac{1}{2}\alpha\sqrt{\frac{2F}{\delta}}. \qquad (a)$$

α est, comme au n° 625, l'angle de la verticale avec le talus naturel des terres, δ est le poids du mètre cube de ces terres. Sur un sol de sable argileux, qui est celui où le glissement est surtout à craindre, on aurait environ $\alpha = 60°$, $\delta = 1500$, et 0,30 pour le coefficient de frottement du mur sur le sol.

Cette formule est également applicable aux fondations des batardeaux et des réservoirs.

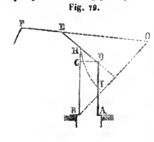
Nous avons vu au n° 625 comment l'on calcule la poussée Q, et le frottement du mur sur sa base; on a donc le moyen de déterminer F.

Ainsi, ayant calculé l'épaisseur du mur, comme on l'a fait application du n° 626, au niveau du sol inférieur, on détermine F; puis la for-

mule précédente (*a*) donne la profondeur h_1, à laquelle il faut descendre la fondation.

630. On donne aussi, pour déterminer la poussée Q, le procédé graphique suivant (*fig.* 79):

Fig. 79.



On abaisse du pied intérieur B du mur une perpendiculaire sur la direction du talus naturel ED des terres, et on la prolonge jusqu'à la rencontre de la plongée FE en O. Déterminant le point de rencontre H de BC avec ED, et prenant OI = OH, on a la poussée

$$Q = \frac{1}{2} \delta \times (BI)^2.$$

PONTS EN BOIS.

631. *Ponts en charpente.* Ces ponts, lorsqu'ils sont d'une certaine importance, doivent être établis sur piles et culées en pierre; pour une communication de moindre importance, on fait ordinairement les supports en bois, surtout ceux intermédiaires. Cependant, avant de donner la préférence au bois, il faut avoir égard aux interruptions de passage que nécessiteront les réparations plus fréquentes, à la moindre durée du pont, aux difficultés que l'on rencontrera pour fonder les supports en pierre et en bois, à la plus ou moins grande largeur de débouché que l'on obtient suivant que l'on emploie le bois ou la pierre, à la moins grande résistance que les palées présentent aux énormes glaçons que charrient quelques rivières, et aux prix des matériaux employés (632).

Nous ne pouvons entrer dans tous les détails de construction des ponts en bois, dont la forme d'ensemble et les dispositions des diverses pièces de charpente peuvent varier à l'infini. Dans une telle construction, l'ingénieur doit étudier avec soin de quelle manière résistent les différentes pièces, afin d'en bien proportionner les dimensions, et combiner les pièces entre elles de manière à former des ensembles capables de résister à tous les efforts qui peuvent les solliciter dans les diverses directions.

Quand le cours d'eau est sujet aux débâcles, il est indispensable de préserver les palées par une pièce de bois inclinée servant de chapeau à plusieurs pieux, et formant avec eux un ensemble isolé de la palée. Ce chapeau s'élève du dessous du niveau des basses eaux au-dessus de celui des plus hautes; sa surface supérieure est formée de deux plans inclinés, dont on arme l'intersection par une barre de fer contre laquelle viennent se briser les glaces.

Nous avons vu, page 740, comment on calcule les dimensions des charpentes en arc de cercle. Pour des arcs surbaissés semblables à ceux employés comme travées de ponts, on calculera la section à l'aide des formules suivantes :

1° Arcs dont la section transversale est un rectangle plein dont b et h sont les dimensions horizontales et verticales :

$$bh^2 = \frac{P}{2R}\left(\frac{h}{s} + \frac{s^3 l}{4}\right);$$

2° Arcs dont la section transversale est une ellipse creuse (page 269), dont b, b' sont les demi-axes horizontaux, et h, h' les demi-axes verticaux :

$$bh^3 - b'h'^3 = \frac{P}{2R}\left(\frac{bh^3 - b'h'^3}{3{,}1416\,(bh - b'h')s} + \frac{s^3 lh}{18{,}849}\right).$$

P et l ont les mêmes significations que page 740, ainsi que R, qui prend encore les valeurs 300 000 et 5 000 000, suivant qu'on fait usage de bois ou de métal.

s est la longueur en mètres de l'arc ayant un mètre de rayon et correspondant à l'angle au centre qui correspond à l'arc du pont.

On a respectivement, pour les rapports de la demi-ouverture c de l'arc à sa flèche f

$\frac{c}{f} =$	2	3	4	5	10	15	20
$s =$	0.925	0.641	0.489	0.376	0.324	0.280	0.105
$s^3 =$	0.792	0.263	0.117	0.053	0.034	0.022	0.001

Le rayon l de l'arc est du reste donné par la formule

$$l = \frac{c^2 + f^2}{2f}.$$

Le tracé de la courbe des pressions éclairera, quant à la stabilité des arcs en bois ou en métal, comme pour la pierre (618).

PONTS MÉTALLIQUES.

632. ***Ponts en métal.*** Les fermes des ponts peuvent être faites en fer ou en fonte, ou avec ces deux métaux réunis, ou encore avec ces deux métaux combinés séparément ou ensemble avec le bois. Dans ces sortes de fermes, il convient de n'employer la fonte que pour supporter des efforts de pression. Ces fermes métalliques s'établissent sur des piles et culées en pierre, qui doivent s'élever jusqu'au tablier du pont, afin que les vibrations d'une arche ne se transmettent pas aux autres. Cette précaution doit être prise également pour les ponts en bois.

Les fermes en fonte sont ordinairement en arc de cercle, et composées d'un certain nombre de voussoirs plus ou moins longs. Sur les chemins de fer, pour des portées qu'il convient de limiter à 8 mètres quand les ponts sont sous rails, on a beaucoup employé la fonte sous forme de poutres, dont on détermine les dimensions à l'aide des formules du n° 221.

Les fermes en fer sont le plus souvent en arc de cercle et composées ordinairement d'une seule pièce; on a cependant établi des fermes en fer droites et formées de barres droites composant des systèmes rigides.

Dans ces derniers temps on a beaucoup employé la tôle pour l'établissement des fermes de ponts des chemins de fer. Ces fermes sont généralement des poutres droites, dont la section, que l'on a variée d'un pont à un autre, se calcule à l'aide de la formule du n° 221; cependant, dans quelques constructions récentes, mais de moindre importance, on a encore employé la tôle pour des fermes courbes.

La section des poutres en tôle est celle d'un rectangle creux, et pour les portées ordinaires elle est le plus ordinairement en double T, dont la tige et les nervures sont formées de plaques de tôle, le tout relié par des cornières en fer.

Comme les poutres en tôle ont une grande hauteur, leur face supérieure est ordinairement à un niveau supérieur à celui du plancher; elles servent assez souvent de parapet, et les deux voies du chemin de fer sont séparées par une poutre intermédiaire.

Des poutrelles ou entretoises en tôle à section double T reposent sur les nervures inférieures des poutres; sur ces entretoises on place des longrines qui supportent les rails et un plancher en bois sur lequel on étale une couche de sable.

Comme les poutres de tête ne sont chargées que d'un côté, pour éviter leur torsion, on les relie solidement par les entretoises, auxquelles on donne une certaine hauteur, et par suite une grande rigidité qui s'oppose à cette torsion. Sous ce point de vue, quand la hauteur le permet, il y a avantage à placer le plancher sur les poutres, qui peuvent alors être en plus grand nombre, de moindre section et plus maniables.

Exemples de quelques ponts en tôle :

Le premier pont en tôle établi en Angleterre, vers 1847, est formé de trois poutres creuses à section rectangulaire, entre lesquelles sont établies les deux voies du chemin de fer. Chaque poutre a 20^{m},11 de longueur et 18^{m},28 entre les culées; l'épaisseur de la tôle est de 0^{m},0095.

Les poutres de l'embarcadère flottant de Liverpool sont construites dans le même système. Elles ont 45^{m},71 de long; leur hauteur est de 1^{m},67 aux extrémités, et de 2^{m},59 au milieu; le corps de la poutre a 0^{m},61 d'épaisseur. La partie supérieure est divisée, par une cloison, en deux canaux rectangulaires ayant ensemble 0^{m},76 de largeur et 0^{m},30 de hauteur.

Un des plus beaux ponts à poutres creuses en tôle est celui qui vient d'être construit sur le Trent, à Grainsborough, pour le passage du chemin de fer de Manchester et de Sheffield. Ce pont est formé de deux travées de 46m,92 d'ouverture chacune. Les poutres ont 3m,65 de haut.

La plus gigantesque construction en tôle est le pont-tube Britannia, construit par M. Stephenson, pour le passage sur la crique de Conway et le bras de Menay du chemin de fer de Chester à Holyhead. Ce pont se compose de 4 travées; les deux travées extrèmes ont 70m,09 de portée, les deux travées moyennes offrent un débouché de 140m,26 chacune. La longueur totale de l'ouvrage, y compris les piles et les culées, est de 561m,30. Les vaisseaux à voile peuvent passer sous le pont avec tous leurs mâts dehors. Ce pont se sompose de deux tubes rectangulaires en tôle, dans chacun desquels passe une des voies du chemin. Il a coûté le prix excessif de 40000 francs le mètre courant, dont 21 000 francs pour les fers seulement.

Chaque grand tube est formé d'une enveloppe extérieure, en plaques de tôle de 1m,20 à 2m,40 de long sur 0m,60 de large, et de 0m,0156 d'épaisseur au milieu du tube et 0m,0125 aux extrémités. Ces plaques sont rivées ensemble, et renforcées par des cornières de chaque côté des joints.

Le plafond du tube est formé de 8 tubes cellulaires, larges chacun de 0m,506 et hauts de 0m,525. Le plancher est composé de 6 tubes cellulaires de chacun 0m,6875 de largeur sur 0m,525 de hauteur.

La hauteur du tube, y compris les cellules du plancher et du plafond, est de 6m,68 aux extrémités et de 7m,65 au milieu; sa largeur, comptée en dehors des plaques formant les parois latérales, est de 4m,20.

Pour permettre la libre dilatation du tube, les extrémités reposent sur 24 paires de rouleaux en fer.

Avant d'exécuter ce pont, par de nombreuses expériences sur des modèles au 1/6, on a constaté que la résistance à la rupture par traction de la partie inférieure de la poutre devenait égale à la résistance à la rupture par compression de la partie supérieure, lorsque la section de la partie inférieure était à celle de la partie supérieure dans le rapport de 11 à 12 (no 225).

Les chemins de Versailles, de Saint-Germain, de Rouen et de l'Ouest traversent la Seine, à Asnières, sur un pont en tôle composé de cinq travées, dont les deux extrêmes ont 31m,09 d'ouverture et les trois autres 32m,70.

Les poutres en tôle sont des tubes à section rectangulaire de 2m,25 de hauteur; elles sont contreventées par des croix de Saint-André verticales en fer à section en E, et haut et bas par des traverses en T, dont les supérieures portent la voie posée sur des longrines en bois. La voie se trouve au niveau de la face supérieure des poutres, dont celles de rives, chargées seulement d'un côté, ne travaillent pas d'une manière très-satisfaisante.

Le chemin de fer du Nord traverse le canal de l'Escaut sur un pont dont les poutres en tôle sont à double T. Il y a deux travées de chacune $14^m,53$ d'ouverture. Les poutres de tête ont $1^m,40$ de hauteur, le corps a $0^m,018$ d'épaisseur, $0^m,009$ pour chacune des feuilles qui le composent; les semelles horizontales ont $0^m,150$ de largeur sur $0^m,015$ d'épaisseur; elles sont reliées au corps vertical par des cornières en fer solidement rivées. Des consoles en fonte supportent les garde-corps en dehors des poutres, qui se trouvent ainsi chargées à peu près symétriquement de chaque côté. La poutre du milieu est plus forte que celles de tête, en raison de la charge plus considérable qu'elle porte. Les poutrelles sont très-fortes; elles contreventent les poutres, et elles supportent des longrines sur lesquelles sont posés les rails. La voie est à peu près au niveau de la face supérieure des poutres.

Ce qui suit est extrait d'une *Note sur les ponts en tôle du chemin de fer de ceinture*, publiée par M. Brame, ingénieur des ponts et chaussées, dans les *Annales*, année 1853.

Légende du tableau suivant.

1. ***Pont sur l'avenue de Clichy.*** Ce pont est supporté par 3 poutres reliées à leurs extrémités et dans l'intervalle par des entretoises. Les poutres et les entretoises sont en double T et formées de plaques de tôle reliées par des cornières en fer rivées. Sur les entretoises reposent les longrines supportant les rails, et un platelage recouvert d'une couche de sable. Les longrines ayant $0^m,15$ d'épaisseur, il en résulte que les poutres ne font saillie que de $0^m,146$ sur le niveau des rails.

2. ***Pont sur la rue de l'Entrepôt.*** Ce pont est biais à 75°; son tablier est analogue à celui du pont précédent; comme il est à 3 voies, il est supporté par quatre poutres, dont celles du milieu sont espacées de $3^m,36$ d'axe en axe.

3. ***Pont sous le chemin de fer du Nord.*** La hauteur disponible étant faible, on a dû restreindre celle des poutres, dont le nombre est de 5. Les rails sont encore placés sur longrines. Un platelage de $0^m,07$, reposant sur des fourrures en bois, est établi au niveau des longrines et des poutres, de sorte que les rails seuls sont en saillie. Une couche de sable recouvre le platelage.

4. ***Pont supportant la route de Paris à Saint-Denis sur le chemin de fer de ceinture.*** La chaussée supportée a $66^m,00$ de largeur, divisés en trois parties sensiblement égales; les deux extrémités sont réservées aux piétons; la partie centrale se compose d'une chaussée pavée de 8 mètres, et de deux chaussées latérales en empierrement de 7 mètres chacune de largeur.

Sous les contre-allées réservées aux piétons, la charpente du tablier a été composée de poutres en fer double T de $0^m,22$ de hauteur, réunies par des entretoises de même forme. Sur cette charpente on a établi un plancher en tôle ondulée, que l'on a recouvert d'une couche de béton fin, puis du bitume sur lequel on marche.

Pour la partie de 22 mètres destinée au passage des voitures, et pour laquelle nous avons formé la 4e colonne du tableau suivant, les poutres sont en tôle comme pour les ponts précédents; elles sont également reliées par des entretoises en tôle; mais au lieu d'établir un platelage pour supporter la chaussée, on a fait des voûtes en briques reposant sur des coussinets placés sur les semelles inférieures des poutres. Ces voûtes ont $0^m,22$ d'épaisseur et $2^m,62$ de rayon.

Il n'y a que trois cours d'entretoises; mais entre la première et la deuxième poutre, de chaque extrémité il y a des entretoises supplémentaires pour résister à la poussée des voûtes.

Les extrados des voûtes sont au niveau des poutres ; on a nivelé le tout avec du béton, que l'on a couvert d'une chape en bitume, sur laquelle repose la couche de sable, puis le pavé de $0^m,15$ d'épaisseur.

L'épaisseur totale de la chaussée, comptée du dessous des poutres, est de $0^m,95$ au milieu et de $0^m,65$ près des contre-allées. Le bombement est gagné sur la couche de sable.

5. *Pont du chemin d'Aubervillers.* Ce pont, supportant une route vicinale peu importante, est établi suivant un biais de 71°. Il a une ouverture de $7^m,87$ suivant le biais et de $7^m,40$ normalement aux culées.

Le tablier se compose de deux poutres de tête parallèles à l'axe du chemin, et de huit entretoises parallèles à la voie de fer. Ces entretoises supportent un plancher analogue à ceux des ponts suspendus, et de $3^m,50$ entre les trottoirs.

6. *Pont du chemin de fer de Strasbourg.* Le chemin de ceinture passe sous la ligne de Strasbourg, qu'il rencontre sous un angle de 35°. L'ouverture du pont est de $7^m,40$ normalement aux culées.

Il était nécessaire, pour ne pas placer le chemin de ceinture trop bas, de diminuer autant que possible l'épaisseur du plancher. Pour cela, on a supporté le plancher à l'aide de trois poutres longitudinales reliées par des entretoises perpendiculaires à leur direction, et les longrines, qui ont $0^m,30$ sur $0^m,186$, au lieu de reposer sur les entretoises, sont placées dans des caissons en tôle et cornières reposant à leurs extrémités sur les semelles inférieures des entretoises. Les deux feuilles verticales du caisson sont fixées aux entretoises par des cornières, régnant et portant la charge sur toute leur hauteur. Le rail, qui fait seul saillie au-dessus des entretoises, répartit d'ailleurs la pression sur les longrines, forcément interrompues à leur rencontre avec les entretoises. Cette disposition est applicable à des portées beaucoup plus grandes sans qu'il soit nécessaire d'augmenter l'épaisseur du tablier.

DÉTAILS.			1	2	3	4	5	6
			m.	m.	m.	m	m.	m.
Poutres.		Longueur totale	9.002	7.20	8.40	8.40	9 00	15.00
		Portée	8.002	6.20	7.40	7.40	7.87	»
		Écartement d'axe en axe	3.71	3.634	1.675	2.072	6.00	3.90
		Hauteur	0.80	0.70	0.508	0.45	0.60	1.00
		Épaisseur de la tôle verticale	0.01	0.01	0.01	0.012	0.01	0.01
	Poutres de têtes.	Largeur de la semelle horizontale	0.18	0.18	0.20	0.30	0.20	0.40
		Épaisseur *id.*	0.025	0.021	0.025	0.02	0.01	0.027
	Poutres intermédiaires.	Largeur des semelles horizontales	0.30	0.18	0.265	0.30	»	0.40
		Épaisseur *id.*	0.020	0.0345	0.036	0.03	»	0.0405
	Cornières.	Largeur et hauteur totale	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09
		Épaisseur	0.01	0.01	0.014	0.012	0.012	0.012
Entretoises.		Écartement d'axe en axe	1.286	1.161	1.20	2.05	1.22	2.00
		Hauteur	0.35	0.35	0.35	0.45	0.35	0.23
		Épaisseur de la tôle verticale	0.008	0.008	0.008	0.01	0.01	0.01
		Largeur des semelles horizontales	0.148	0.14	0.138	0.16	0.17	0.36
	Cornières.	Largeur et hauteur totale	0.07	0.07	0.065	0.07	0.08	0.08
		Épaisseur	0.01	0.01	0.01	0.01	0.012	0.012
Poids total du tablier.			15500	18000	18500	250000	9000	30000

Calcul des poutres et entretoises. Pour les ponts 1 et 2, qui ont une faible portée, la surcharge maximum se réalise quand il y a une locomotive sur chaque voie, et que les roues motrices sont au milieu du pont. Pour une locomotive de 29 tonnes, si l'on admet que 17 tonnes reposent sur les roues motrices, et 6 tonnes sur chacune des autres paires de roues, dont les essieux sont espacés de 4 mètres (458), décomposant 6000 kilog. en deux forces appliquées l'une au milieu de la poutre et l'autre sur la culée, la première composante est, pour le pont n° 1, $6000 \times \frac{2,001}{4,001}$ soit 3000 kilog. (*Int.* 1021). La surcharge, appliquée au milieu du pont, équivalente à une locomotive est donc 23000 kil. La poutre du milieu supporte alors la moitié du poids du tablier réparti uniformément sur toute sa longueur, plus une charge de 23000 kilog. agissant en son milieu; la formule du n° 221 donnera alors ses dimensions. Les poutres de rive agissent comme celle du milieu, mais seulement sous des charges deux fois plus faibles.

Quant aux entretoises, la surcharge la plus considérable se réalise quand les deux roues motrices passent dessus. Pour le pont n° 1, le poids appliqué au milieu de l'entretoise, équivalant à la charge transmise par les roues motrices, est, ces roues étant espacées de $1^m,50$ et l'entretoise ayant $3^m,71$ de longueur, $17000 \times \frac{1,105}{1,855}$, soit 10000 kilog. Près de cette surcharge le poids du tablier reposant sur l'entretoise étant négligeable, les formules du n° 219 sont applicables.

Pour le pont 3, on suit une marche analogue pour calculer les sections des poutres et des entretoises.

Pour le pont 6, qui est assez long, à cause de son biais, pour qu'une partie du tender ou d'une seconde locomotive s'y trouve en même temps que la première, on suit encore la même marche; mais on peut simplifier la question pour les poutres en supposant qu'une surcharge de 80 tonnes est répartie uniformément sur la longueur de chaque voie, indépendamment du poids du tablier (220).

Quant aux ponts 4 et 5, on calcule les poutres et les entretoises en supposant que la surcharge indépendante du poids du tablier est de 400 kil. uniformément répartis sur chaque mètre carré (220); c'est la charge d'épreuve.

Devis, rapporté au mètre superficiel, du tablier du pont n° 4 (route de Saint-Denis), *de* $7^m,40$ *d'ouverture.*

1° *Pour la chaussée proprement dite, qui a* $22^m,00$ *de largeur :*

	fr.
Tôle pour poutres et entretoises.	94,666
Fonte pour sabots, plaques et retombées.	7,990
Plomb pour scellements.	4,676
Voûtes en briques hourdées en ciment.	12,416
Cintres.	2,928
Chape en mortier.	2,910
Chape en bitume.	5,000
Chaussée pavée..	9,000
Prix du mètre carré de tablier pour chaussée. . . .	139,586

2° *Pour les contre-allées :*

	fr.
Poutres, entretoises et boulons d'assemblage.	25,808
Plaques en fonte.	0,915
Tôles ondulées, ...	12,565
Fers méplats, cornières, etc.	1,927
Chape en béton.	2,910
Bitume	5,000
Total.	49,125

Comparaison entre les prix des ponts en tôle et ceux des ponts en maçonnerie. Les chiffres suivants ne comprennent que les travaux d'art et non point les abords.

	fr.
Pont n° 4 (route de Saint-Denis) pour la chaussée de $7^m,40$ de portée et de $22^m,00$ de largeur réservée aux voitures, en tôle.	38 365,83
La tôle figure dans ce prix pour.	18 368,00
Ce pont établi en maçonnerie aurait coûté.	36 000,00
Pont n° 5 (chemin d'Aubervilliers), de $7^m,40$ d'ouverture et de $6^m,00$ de largeur, en tôle.	16 532,15
Le même pont en maçonnerie.	17 500,00
Pont de 14 mètres d'ouverture projeté pour supporter le chemin de ceinture au-dessus de la route de Flandre, en tôle.	30 000,00
Le même pont en maçonnerie.	32 500,00

Ces chiffres montrent que, pour les faibles portées et avec les prix admis aux environs de Paris, la tôle ne présente d'avantage réel sur la maçonnerie qu'en ce qui a rapport à la moindre épaisseur de tablier et à la plus grande facilité d'exécution.

Avec les prix du chemin de fer de ceinture, $0^f,45$ le kilog. de fer, et $0^f,35$ le kilog. de fonte, les planchers à poutres en fonte coûtent plus cher que ceux en tôle. En employant, comme le font quelques ingénieurs, de la fonte de première fusion, on réduirait le chiffre de $0^f,35$.

633. *Planchers de ponts en poutres de fonte double* T *et voûtes en briques*. Ce système, qui a une grande ressemblance avec celui du pont n° 4 du numéro précédent, dans lequel les poutres sont en tôle au lieu d'être en fonte, a été employé avec beaucoup de succès par M. Flachat pour supporter les chaussées au-dessus du chemin d'Auteuil, et dans la construction des caves de la nouvelle gare du chemin de fer de l'Ouest.

Au chemin d'Auteuil, pour une ouverture de $7^m,00$ entre les culées et une largeur de pont de $8^m,00$, dont $1^m,00$ de chaque côté pour trottoirs, le plancher se compose de 4 poutres double T espacées de $2^m,00$ d'axe en axe pour supporter la chaussée de $6^m,00$, et de deux poutres de tête espacées de $1^m,00$ des voisines pour supporter un côté des trottoirs, qui sont en madriers de $0^m,08$ d'épaisseur. Les poutres intermédiaires ont $0^m,60$ de hauteur et celles de tête $0^m,80$. Les faces inférieures des poutres sont toutes de niveau et à une hauteur de $4^m,50$. Les 4 poutres de la chaussée sont reliées par deux cours d'entretoises en fonte double T, de $0^m,30$ de hauteur et de $0^m,12$ de largeur de semelles, divisant la distance des culées en trois parties égales de $2^m,333$. C'est sur les semelles de ces entretoises et sur les culées que reposent les voûtes en bonnes briques ordinaires, de $0^m,22$ d'épaisseur et de $2^m,33$ de flèche, lesquelles, par cette disposition, ne poussent pas les poutres au vide comme au pont 4 du numéro précédent, et reportent une partie de leur poids sur les culées. Les entretoises reposent sur les semelles inférieures des poutres, et leurs extrémités portent des oreilles qui permettent de les relier solidement aux joues des poutres par 4 boulons.

On a donné aux poutres la forme de solides d'égale résistance, en faisant varier, non la hauteur h de la pièce (227), mais seulement h', c'est-à-dire l'épaisseur des nervures.

Pour déterminer la section de la poutre en un point quelconque situé à la distance x du point d'appui voisin, on a d'abord cherché le moment de la charge par rapport au point correspondant à x; ce moment est, en supposant la charge uniformément répartie, ce qui n'a pas lieu dans le cas actuel, qui donne cependant des sections à très-peu près les mêmes et que l'on peut adopter dans la pratique,

$$\frac{p}{2}(Lx - x^2).$$

Égalant ce moment à celui de résistance des fibres, on a

$$\frac{p}{2}(Lx - x^2) = \frac{RI}{n}. \qquad (220)$$

Pour une poutre double T, on a (n° 215, fig. 40)

$$\frac{p}{2}(Lx - x^2) = \frac{R}{n}\,\frac{bh^3 - b'h'^3}{12}.$$

Formule dans laquelle $n = \frac{h}{2}$ quand les deux nervures sont égales, comme on le fait généralement, et dont celle du n° 220 n'est qu'un cas particulier où $x = \frac{L}{2}$.

Au chemin d'Auteuil on a fait pour les poutres de la chaussée proprement dite $p = 1600$ kil. par mètre courant de poutre, surcharge comprise, $h = 0^m,60$, $b = 0^m,28$ environ, $b' = 0^m,26$ (l'épaisseur de l'âme de la poutre est $0^m,02$), et de la formule précédente on a déduit $h' = 0^m,52$, c'est-à-dire $\frac{h - h'}{2} = 0^m,04$ pour l'épaisseur des nervures au milieu de la longueur de la poutre.

La formule précédente donne de même les valeurs de h', et par suite les épaisseurs des nervures, pour les différentes valeurs de x; mais comme il ne convient pas que l'épaisseur des nervures soit inférieure à celle de l'âme de la poutre, que l'on prend aussi petite que le comporte un coulage satisfaisant, dès qu'on arrive à cette limite, la diminution de la section se reporte sur h, dont la formule donne encore les valeurs, et comme pour $x = 0$ on aurait $h = 0$, on assigne à h une valeur-limite inférieure, laquelle, une fois atteinte, reste constante jusqu'à l'extrémité de la poutre. Cette valeur inférieure de h, au chemin d'Auteuil, est de $0^m,40$.

Pour les entretoises, on a fait $L = 2^m,00$, $h = 0^m,30$, $b = 0^m,20$, $b - b' = 0^m,012$ et $\frac{h - h'}{2} = 0^m,014$.

L'épaisseur du plancher au milieu de la chaussée est de $0^m,75$.

PONTS SUSPENDUS.

634. *Ponts suspendus.* Dans ce système de ponts, comme le fait voir la fig. 33, planche III, une chaîne en fer, ou un câble en fil de fer, dont les extrémités sont solidement amarrées dans le sol, passe sur deux piliers en maçonnerie, et supporte, à l'aide de tiges en fer, le tablier du pont.

Les tiges de suspension a, b, c, etc., étant toutes également éloignées horizontalement, et le poids total, câble, tiges, tablier, charge d'épreuve, etc., étant le même entre deux tiges consécutives quelconques, ce qui a lieu sensiblement dans un pont suspendu, les points d'attache a, b, c, d, etc., des tiges sur le câble, sont sur une même parabole dont l'équation est

$$y = \frac{p}{2Q}(x^2 - x_0^2). \qquad (Int.\ 930)$$

y et x coordonnées d'un quelconque des points *a*, *b*, *c*, *d*, etc. ;
x_0 abscisse du premier point *a* placé sur la partie horizontale *a'a* ;
p charge par mètre de longueur de tablier; elle comprend le poids du câble, des tiges, du tablier, de la surcharge, etc.;
Q tension horizontale de la chaîne; c'est la seule force qui sollicite la partie horizontale *aa'*.

Si au lieu d'avoir un côté horizontal *aa'*, le point d'attache *a* se trouvait au sommet de la courbe, on aurait $x_0 = 0$, et l'équation précédente deviendrait

$$y = \frac{p}{2Q} x^2.$$

Si dans cette équation on fait :

$y = f$, flèche correspondant à la partie parabolique du câble, partie que l'on peut supposer s'étendre au delà des tiges extrêmes de suspension, d'une quantité dont la projection horizontale est égale à la demi-distance horizontale de deux tiges consécutives;

$x = d$, abscisse du point où finit la parabole. Il est à remarquer que si les extrémités du tablier ne portaient pas sur les culées, et si le tablier se prolongeait d'une demi-distance horizontale de deux tiges consécutives au delà des tiges extrêmes, d serait la demi-ouverture du pont ou la distance horizontale du sommet de la courbe à l'extrémité du tablier que l'on considère, et f correspondrait à cette extrémité; au delà des points qui fournissent d et f, et jusqu'aux points de suspension, les câbles se prolongent très-sensiblement en ligne droite suivant les tangentes aux extrémités de la courbe,

on a

$$Q = \frac{pd^2}{2f}.$$

635. *Tension des chaînes.* Toutes les autres forces qui sollicitent les différents points de la chaîne étant verticales, il en résulte que la tension horizontale Q est constante, et que si l'on considère une autre partie quelconque *eg* de la chaîne, sa tension sera la résultante de la force horizontale Q, et d'une force verticale égale à la somme des poids appliqués depuis le point *e* jusqu'au sommet de la courbe, poids qui est égal à px_1, x_1 étant l'abscisse du point milieu de *eg*. Comme les deux composantes Q et px_1 sont perpendiculaires entre elles, leur résultante, que nous désignerons par T_1, est

$$T_1 = \sqrt{Q^2 + p^2 x_1^2}.$$

La tension de la chaîne est à son maximum au sommet du pilier, ou sensiblement au point correspondant à f et d (634), car la partie droite du câble, dans la plupart des cas, peut être négligée, et pour ce point, si l'on représente par T la tension, on a

$$T = \sqrt{Q^2 + p^2 d^2}.$$

Remplaçant Q par sa valeur, il vient

$$T = \sqrt{\frac{p^2d^4}{4f^2} + p^2d^2} = \frac{pd}{2f}\sqrt{d^2+4f^2}.$$

Formule à l'aide de laquelle on calculera la section des câbles, car l'augmentation de tension due à la portion droite du câble entre la partie courbe et le point de suspension est en général négligeable.

636. *Longueur des tiges de suspension.* On a (634)

$$y = \frac{p}{2Q}x^2 = \frac{f}{d^2}x^2.$$

Donnant successivement à x les valeurs qui correspondent aux diverses positions des tiges, on en conclut les valeurs respectives de y, et en ajoutant à chacune des valeurs de y une longueur égale à la distance à laquelle les diverses tiges descendent au-dessous du sommet de la courbe, on aura les longueurs des tiges.

Quand on aura besoin de connaître la longueur totale de toutes les tiges, s'il y a une tige placée au sommet de la courbe, la somme de toutes les parties comprises au-dessus du niveau de ce sommet, et pour chaque côté de ce sommet, sera égale à la somme de toutes les valeurs précédentes de y, c'est-à-dire à

$$s = \frac{fl^2}{d^2}(1^2 + 2^2 + 3^2 + \text{etc.}).$$

Or, la somme des carrés des n premiers nombres entiers consécutifs étant $\frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$, cette formule devient

$$s = \frac{fl^2}{6d^2}n(n+1)(2n+1).$$

s somme totale des parties de tiges comprises au-dessus du sommet de la courbe, pour un côté de ce sommet;
l distance des tiges; l, $2l$, $3l$, etc., sont les diverses valeurs que l'on a substituées à x pour obtenir la formule précédente.
f et d ont les mêmes significations qu'au n° 634.

Lorsqu'il n'y a pas de tige au sommet, si l'on fait $l_1 = \frac{l}{2}$, on remarque que les abscisses des points successifs d'attache sont l_1, $3l_1$, $5l_1$, etc., et on a

$$s = \frac{fl_1^2}{d^2}(1^2 + 3^2 + 5^2 + \text{etc.}).$$

La somme des carrés des n premiers nombres impairs étant $\frac{1}{3}n(4n^2-1)$, il vient donc

$$s = \frac{fl_1^2}{3d^2} n (4n^2-1).$$

Pour avoir la longueur totale des tiges, à la somme s des parties supérieures au point bas de la courbe, il faut ajouter la somme des parties inférieures à ce point. Si le plancher était horizontal, cette seconde somme serait égale au produit de la quantité dont chaque tige descend au-dessous du point bas par le nombre des tiges. Si le tablier a une forme parabolique, on peut calculer cette seconde somme en procédant de la même manière que pour la première. Mais, dans cette évaluation de longueur totale, on peut supposer que toutes les tiges descendent à une même distance au-dessous du point bas de la courbe.

M. Mary rapporte avoir ouï dire à un constructeur de ponts suspendus que pour ne pas s'inquiéter du bombement du tablier, il calculait la longueur de ses tiges dans l'hypothèse d'un tablier horizontal, et qu'il donnait à la chaîne une longueur diminuée de manière à relever le sommet de la parabole du bombement qu'il voulait donner au plancher. D'après le même constructeur, une travée de 100 mètres s'abaisserait de 0^m,10 au sommet après la pose du tablier; il faut donc avoir égard à cette circonstance en réglant la longueur des tiges.

637. *Longueur de la chaîne.* Cette longueur est égale à la somme des parties droites comprises entre les différents points de suspension. En remarquant que l'une quelconque u_n de ces parties est l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont l'un des côtés est la distance l des tiges, et dont l'autre est la différence des deux ordonnées y_n et y_{n-1} des deux extrémités de la partie droite considérée (636), il en résulte qu'on a

$$u_n = \sqrt{l^2 + (y_n - y_{n-1})^2}.$$

Calculant de même la longueur des divers éléments de la chaîne, en en faisant la somme on aura la longueur totale.

On conçoit que ces calculs sont assez longs; dans le plus grand nombre de cas on n'a pas besoin d'avoir la longueur rigoureuse de la chaîne, et on peut la supposer égale à la longueur de la parabole circonscrite, longueur qui est, pour un côté, à partir du sommet et jusqu'au point correspondant à f et d (634),

$$L = d\left(1 + \frac{2f^2}{3d^2}\right). \qquad (a)$$

La chaîne étant symétrique par rapport au point bas, on aura la longueur totale de la partie parabolique en doublant cette valeur de L. Si la chaîne ne s'élevait pas à la même hauteur à ses deux extrémités, on calculerait la longueur L′ de la seconde partie comme on a calculé L, en modifiant convenablement d et f (634). Ajoutant les longueurs des parties droites du câble à celles des portions paraboliques, on obtiendrait la longueur totale.

638. *Piliers inégalement élevés.* Toutes les formules précédentes s'appliquent encore à ce cas, mais en considérant séparément chaque partie de la courbe, à droite et à gauche du point bas, et en faisant, pour chaque partie, f égal à la flèche extrême de la partie courbe qui y correspond, et d égal à la distance horizontale du point bas au point le plus élevé de la partie courbe considérée (634).

Il faut donc pouvoir déterminer la distance du sommet de la courbe à chaque point de plus grande flèche de chacune des parties courbes. f_1 et f_2 étant ces plus grandes flèches, qui sont des données du projet, $2d$ la distance totale horizontale des points de flèches f_1 et f_2, d_1 la distance horizontale du sommet de la courbe au point de flèche f_1, et d_2 sa distance au point de flèche f_2, on a

$$d_1 = \frac{2d\sqrt{f_1}}{\sqrt{f_1}+\sqrt{f_2}}, \quad \text{et par suite} \quad d_2 = 2d - d_1.$$

On a aussi

$$d_2 = \frac{2d\sqrt{f_2}}{\sqrt{f_2}+\sqrt{f_1}}.$$

639. *Augmentations de la longueur de la chaîne et de la flèche par suite de la dilatation et de la tension de la chaîne.* L étant la longueur de la partie courbe de la chaîne (637), le fer s'allongeant de $0^m,0000122$ par degré centigrade (255), pour une augmentation de température de t°, la longueur L s'allongera de

$$\delta = L \times 0{,}0000122 \times t,$$

et la longueur de la chaîne deviendra $L+\delta$.

Appelant x l'augmentation de la flèche, cette flèche deviendra $f+x$. Substituant ces nouvelles valeurs des longueurs de chaîne et de flèche dans la formule (a), n° 637, on a

$$L+\delta = d\left(1 \times \frac{2}{3}\,\frac{f^2+2fx+x^2}{d^2}\right).$$

Retranchant L du premier membre, et sa valeur du second (637), on a

$$\delta = d \times \frac{2}{3}\,\frac{2fx+x^2}{d^2};$$

d'où on tire, en négligeant x^2, qui est très-petit près de fx,

$$x = \frac{3d}{4f}\,\delta.$$

Cette formule, qui donne directement x en fonction de δ, n'est rigoureusement applicable que quand la courbe est symétrique par rapport à

son point bas, c'est-à-dire quand les deux piliers s'élèvent à la même hauteur, et que, par suite, δ est l'allongement de chacune des deux parties courbes de la chaîne.

On peut encore établir des formules semblables aux précédentes pour déterminer l'augmentation de flèche due à la tension des chaînes. Ainsi on a

$$\delta' = \frac{L \times 0{,}000054 \times T}{\omega} = \frac{L \times T}{18518\omega}.$$

δ' allongement de la longueur de la demi-parabole;
L longueur de la demi-parabole (637);
$0^m{,}000054$ allongement d'une tige de fer de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre carré de section, sous une tension de 1 kilogramme (211);
T tension du câble en kilogrammes; cette dernière formule la suppose uniforme sur toute la longueur de la chaîne;
ω section de la chaîne en millimètres carrés.

Représentant par x' l'augmentation de flèche due à δ', on a encore

$$x' = \frac{5d}{4f}\delta'.$$

La détermination de l'allongement des parties droites des câbles au delà des portions courbes n'offre aucune difficulté, et on déterminera facilement son influence sur l'abaissement du sommet de la courbe.

640. *Section des chaînes et des tiges.* La tension des chaînes variant en tous les points de la longueur, il en résulte que la section pourrait être variable en tous ces points. Cependant on fait cette section constante, et suffisante pour résister avec toute sécurité à la valeur maximum de T (635). Quoique le fer de l'échantillon employé pour les chaînes ne se rompe que sous un effort moyen de 40 kilogrammes par millimètre carré de section, les autorités prescrivent de ne pas le soumettre à une charge de plus de 12 kilogrammes. Pour le fil de fer, la charge maximum prescrite est de 18 kilogrammes, quoiqu'il ne se rompe que sous une tension moyenne de 60 kilogrammes (211). Ainsi, selon que l'on fera usage du fer forgé ou du fil de fer, ω étant, en millimètres, la section des chaînes ou des câbles, on aura au minimum

$$\omega = \frac{T}{12}, \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{T}{18}.$$

ω est la section de tous les câbles quand, dans la valeur de T, p comprend le poids de tout le tablier, de toutes les tiges et chaînes, et la surcharge de 200 kilogrammes par mètre carré que l'on répartit sur tout le pont lors de l'essai (page 856). Connaissant ω, en divisant par le nombre total de chaînes, on aura la section de chacune d'elles, que l'on place en même nombre de chaque côté du pont.

Nous disons que p contient le poids de la chaîne ; mais comme ce poids n'est pas connu, puisqu'il dépend de la section, il convient de lui attribuer une valeur que l'on préjuge convenable, de déterminer la valeur correspondante de T, et par suite celle de ω ; de cette valeur de ω on conclut une seconde valeur de p qui permet de calculer T et ω aussi exactement qu'il est nécessaire.

La section des chaînes, multipliée par leur longueur (637), puis par la densité du fer, donnera leur poids total.

De la charge d'une tige de suspension, on conclura la section comme pour les chaînes. La charge d'une tige est égale à la moitié du poids d'une longueur de tablier égale à la distance de deux tiges successives, plus la moitié du poids de la plus lourde voiture qui peut passer sur le pont ; il conviendrait encore de faire entrer le poids de la tige dans la charge qu'elle supporte, mais ce poids est négligeable.

M. Endrès, ingénieur des ponts et chaussées, dans un travail qu'il a bien voulu nous communiquer, et que depuis il a publié dans les Annales du corps auquel il appartient, a posé une formule qui évite le tâtonnement dont il vient d'être question pour calculer la section des câbles.

Dans son travail, M. Endrès remarque que la tension du câble, posée n° 635, peut se mettre sous les deux formes

$$T = \frac{pd}{4\mu}\sqrt{16\mu^2+1} \quad \text{et} \quad T = \frac{pd}{\sin\alpha}.$$

μ rapport de la flèche f au double de d (634) ;
α angle que forme la tangente à la courbe, au point le plus élevé, avec l'horizon. Cette tangente venant rencontrer l'axe de la courbe à une distance au-dessous du sommet égale à f (*Int.*, 940), on a $\operatorname{tang}\alpha = \frac{2f}{d} = 4\mu$, et

$$\sin\alpha = \frac{\operatorname{tang}\alpha}{\sqrt{\operatorname{tang}^2\alpha+1}} = \frac{4\mu}{\sqrt{16\mu^2+1}} \text{ (\textit{Int.}, 815 et 827).}$$

Ayant

$$pd = p'd + L\omega\delta,$$

p' poids par mètre de longueur de pont en négligeant les câbles ; p' est égal à p moins le poids des câbles (634) ;
L longueur du câble (637) ;
δ poids du centimètre cube de la matière dont le câble est composé. Si l'on exprimait L en décimètres et ω en décimètres carrés, on ferait δ égal à la densité de la matière du câble, c'est-à-dire à 1000 δ ;

on peut donc poser

$$T = \frac{p'd + L\omega\delta}{\sin\alpha}.$$

Comme on a aussi, en désignant par ρ la tension qu'il convient de faire supporter à chaque millimètre de la section ω,

$$T = \omega\rho,$$

on a donc

$$\omega\rho = \frac{p'd + L\omega\delta}{\sin\alpha}, \quad \text{d'où} \quad \omega = \frac{p'd}{\rho \sin\alpha - L\delta};$$

expression qui permet de calculer ω sans tâtonnement, et qui devient, suivant que l'on fait usage de chaînes en fer forgé ou de câbles en fil de fer,

$$\omega = \frac{p'd}{12 \sin\alpha - 0{,}0078\,L} \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{p'd}{18 \sin\alpha - 0{,}0078\,L}.$$

La relation posée ci-dessus entre sin α et μ permet de faire disparaître l'angle α de la valeur de ω; on pourrait même proscrire μ en le remplaçant par sa valeur $\frac{f}{2d}$; mais ces substitutions compliqueraient la formule sans aucun avantage réel, attendu que le rapport μ de la flèche à l'ouverture et l'angle α de la tangente extrême avec l'horizon sont des éléments essentiels du problème, éléments qu'il faut calculer dans tous les cas, puisqu'il est nécessaire de s'assurer si les valeurs de d et f sont telles que μ ne sorte pas des limites $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{15}$ qui lui sont communément assignées, et que la connaissance de l'angle α est indispensable pour la détermination ultérieure de la résistance à donner aux piliers de support et de la direction qui convient aux câbles de retenue. Aux limites précédentes de μ correspondent celles $\frac{6}{15}$ et $\frac{4}{15}$ de tang α.

Dans son travail, M. Endrès a fait l'application de sa formule au calcul de la section des câbles ou chaînes de plusieurs ponts choisis parmi les plus remarquables de ceux existants, et les résultats, comme on devait s'y attendre, ont fourni à la théorie une vérification aussi complète que possible.

641. *Fabrication des chaînes et des tiges.* Le fer forgé employé à la fabrication des chaînes doit être de première qualité. Ces chaînes doivent être faites avec le plus grand soin; il faut donner rigoureusement le même diamètre aux boulons de jonction des chaînons et à l'œil qui les reçoit (page 252.)

Quelques précautions que l'on apporte à la fabrication des chaînes en fer forgé, il leur est arrivé de se rompre, en Angleterre, où le fer est de très-bonne qualité, aussi bien qu'en France. Les câbles en fil de fer au contraire ne se sont jamais rompus. Quant à la durée des chaînes et des câbles, l'expérience n'a pas encore prononcé, mais on admet qu'elle est la même pour les chaînes que pour les câbles.

Les fils de fer ordinairement employés à la fabrication des câbles ont 0m,00275 et 0m,00308 de diamètre, ce qui donne pour sections respectives 5mill c.,94, et 7m.c.,45; le premier est du n° 17 et le second du n° 18. Les bouts de fil ont environ 150 mètres de longueur. En les mettant en câbles, on a soin d'opérer sur le fil une traction constante, suffisante pour faire disparaître les ondulations qu'il a prises par suite de la disposition en couronne qu'on lui donne pour le livrer au commerce. Quand un fil est placé sur le câble, on relie son extrémité à un autre bout, afin que le câble terminé soit comme formé d'un seul fil. Pour réunir les extrémités de deux fils, on les croise sur une longueur de 0m,10, et sur 0m,07 de ce croisement on les serre avec un fil recuit du n° 4, dont on met les spires en contact.

Si la température varie pendant la fabrication du câble, il convient de rendre mobile une des croupières sur lesquelles passe le fil à l'extrémité du câble, afin d'opérer sur cette croupière une traction qui tienne toujours bien tendue la partie de câble fabriquée, malgré son allongement dû à la dilatation. Par cette disposition, une fois le câble terminé, tous les fils y sont dans un même état de tension, ce qui est de la plus grande importance pour la solidité du câble. Afin de reconnaître à chaque instant en quel point doit se trouver la croupière mobile, avant de commencer le câble, on tend un fil de fer allant d'une extrémité du câble à l'autre; on tient ce fil dans un état de tension constant à l'aide d'un poids, lequel, étant fixé à l'extrémité d'un fil flexible passant sur une poulie mobile, donne, par son mouvement, les allongements ou raccourcissements du fil étalon, et par suite la position que doit occuper la croupière mobile.

D'après les expériences de M. Leblanc, pour faire disparaître toutes les inflexions que les fils prennent, par suite de leur mise en couronnes, et qu'ils tendent à conserver lorsqu'on les met en câbles, il faut, avant de les contourner sur chaque croupière, les soumettre à une tension de 300 à 500 kilog. Cette précaution porte la résistance du câble aux 0,86 ou 0,90 de la somme des résistances de tous les fils de fer pris séparément; au lieu que si cette traction préalable n'est que de 50 kilog., la résistance totale n'est que les 0,84, et les 0,81 seulement si la tension n'est que de 25 kilog.

Lorsque tout le fil est placé en écheveau sur les deux croupières, on réunit les deux brins de l'écheveau, pour en former le câble, à l'aide de fil de fer dont on fait toucher les spires. D'après M. Leblanc, les câbles autour desquels il y a le plus de ligatures sont les plus résistants. Ordinairement, les ligatures ont de 0m,10 à 0m,11 de longueur et sont éloignées d'un espace à peu près double.

Afin de préserver les câbles de l'oxydation, avant de mettre les fils en écheveaux on les fait passer deux ou trois fois dans un bain d'huile de lin bouillante rendue siccative à l'aide de litharge; puis, quand le



câble est fabriqué et relié de mètre en mètre par des ligatures provisoires, on y applique une nouvelle couche d'huile de lin, rendue siccative comme pour les couches appliquées par immersion. Dans cet état, les câbles sont conservés sous un hangar, en les préservant des chocs, qui, en enlevant le vernis, rendent l'oxydation facile.

Pour mettre les câbles en place, on jette un petit câble allant d'une pile à l'autre; puis, à l'aide de petits supports fixés au grand câble et portant des poulies qui roulent sur le petit câble, on fait avancer le grand câble en le tirant par son extrémité, à l'aide d'un treuil établi sur la pile opposée, jusqu'à ce qu'il soit dans sa position définitive.

Les tiges de suspension du tablier sont en fer forgé lorsqu'on emploie des chaînes; avec les câbles en fil de fer, on peut les exécuter en fil de fer, mais ordinairement on les établit en fer; elles sont plus faciles à fabriquer, et on est plus maître d'en régler la longueur de manière à donner un bombement convenable au plancher lors de sa pose. Les tiges en fil de fer, sans exiger autant de soins et sans être aussi difficiles, se fabriquent par les mêmes procédés que les câbles; on les enveloppe également de ligatures; elles sont habituellement en fils des nos 17 ou 18.

M. Endrès, dans son mémoire cité page 865, rapporte un mode de fabrication des câbles sur place, qu'il a mis en usage dans la construction du pont de Beaumont-sur-Sarthe, et dont l'idée première est due à M. Chaley, constructeur distingué du beau pont de Fribourg et d'un grand nombre d'autres.

Ce mode, dit M. Endrès, se prête merveilleusement à l'établissement des câbles fil par fil et à la place même qu'ils doivent occuper, de sorte que toutes les difficultés inhérentes à la confection en chantier, au transport, au levage et à la pose sont éludées : il consiste à mettre en communication, à travers chaque culée, les parties inférieures des deux puits d'amarre, par une galerie qui permet de réunir deux à deux les extrémités des câbles de chaque tête du pont, et de les attacher l'une avec l'autre au lieu de les amarrer isolément; ou mieux encore, et c'est en cela que consiste le plus grand avantage de ce système, il permet de former fil par fil un ou plusieurs câbles sans fin qui passent d'une tête à l'autre à travers la galerie dont le plafond s'arrondit et s'appareille en forme de voûte renversée, et qui embrassent les maçonneries des culées dans leurs boucles extrêmes.

Il est facile alors de profiter de cette disposition pour rendre les câbles entièrement et constamment visibles et accessibles, en établissant une communication de cette galerie avec le dehors, soit directement dans les têtes si cela est praticable, soit par l'intérieur de la culée en faisant reposer la chaussée sur une voûte longitudinale qui prend pour pieds-droits les murs de tête; on peut dans ce dernier cas diminuer notablement l'épaisseur de ces murs et de celui de la face, at-

tendu que l'absence du remplissage en terre diminue beaucoup la pression sur le premier et l'annule entièrement sur le dernier (643).

La fabrication des câbles sur place nécessite en général l'établissement préalable d'une passerelle de service destinée à livrer passage d'une rive à l'autre à l'ouvrier chargé du transport du fil et de la ligature des brins bout à bout. Cette passerelle consiste simplement en deux câbles de petit diamètre, disposés sous une flèche peu considérable et supportant à environ un mètre d'intervalle, de manière à servir eux mêmes de main courante, un étroit plancher soutenu par des fils de fer. Ainsi établi au niveau de la partie supérieure des culées, cet appareil réduit à une main-d'œuvre facile et rapide, un travail dont l'extrême difficulté par les moyens ordinaires imposait matériellement une limite très-rapprochée à la portée des ponts suspendus.

Ce nouveau procédé constitue réellement un progrès précieux, car c'est surtout dans les grandes ouvertures que le système des ponts suspendus met le mieux en évidence les avantages qu'il présente sous le rapport de la facilité, de la promptitude et de l'économie d'exécution.

M. Endrès pense que dans toutes les circonstances où une voie de communication aurait à franchir une vallée profonde, on ne devrait pas hésiter à construire un pont suspendu de 5, 6, 7 ou 8 cents mètres d'ouverture, pourvu toutefois que les versants de la vallée se trouvent naturellement disposés de manière à permettre d'établir la partie inférieure des supports bien au-dessus du point le plus bas des câbles; car sans cette condition l'obstacle naîtrait de l'impossibilité de construire des supports de 50, 60, 70 ou 80 mètres de hauteur. Le pont de Fribourg, qui est le plus grand qui existe, a $265^m,26$ entre les appuis.

642. *Piliers.* Les chaînes ou câbles passent sur des piliers élevés sur les culées, puis s'infléchissent au delà de ces piliers pour pénétrer dans des massifs de maçonnerie reliés à la culée et auxquels on les fixe solidement.

Le prolongement sA, figure 33, planche III, de la chaîne, au delà du pilier, s'appelle *chaîne de retenue;* il est soumis à la tension maximum T de la chaîne au sommet s (635), et le pilier doit avoir une section suffisante pour résister à la résultante de ces deux tensions égales.

La tension de la chaîne au point s est dirigée suivant la tangente à la courbe en ce point, c'est-à-dire suivant sB, qui rencontre l'axe des y au point B donnant OB = OC. Cela n'est rigoureusement vrai qu'autant que la partie courbe du câble se prolonge jusqu'au point s, et comme il est rare que ce cas se réalise, il vaut mieux dire que la tension T est dirigée suivant la tangente à la courbe au point pour lequel on a défini f et d au n° 634, et que cette tangente rencontre l'axe des y à une distance du sommet égale à f (page 865).

Comme ordinairement les deux angles BsD et AsD sont égaux, il s'ensuit que la résultante de la tension T de la chaîne de suspension et

de celle égale de la chaîne de retenue est dirigée suivant la verticale sD ; d'où, T étant représenté par sB, cette résultante le sera par sD, et en la désignant par R, on aura

$$R : T :: sD \text{ ou } 4f : sB \text{ ou } \sqrt{d^2+4f^2}, \quad \text{d'où} \quad R = \frac{4fT}{\sqrt{d^2+4f^2}}.$$

Remplaçant dans cette formule T par sa valeur (635), il vient

$$R = 2pd ;$$

ainsi le pilier est chargé d'un poids égal à 2 fois celui de toute la portion de système, tablier, câble et surcharge, comprise depuis le point bas du câble jusqu'au pilier considéré.

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'au n° 634.

Connaissant la valeur de R, il sera facile de calculer la section à donner aux piliers pour y résister (213).

Lorsque l'angle AsD n'est pas égal à l'angle BsD, la résultante R partage encore l'angle AsB en deux parties égales, et n'est plus par conséquent dirigée suivant la verticale sD; alors R se décompose en deux forces : l'une verticale, dirigée suivant sD et qui agit par compression sur le pilier; l'autre horizontale, qui tend à renverser le pilier et à le faire glisser sur sa base ou sur ses joints. Le pilier doit avoir des dimensions suffisantes pour résister à l'une et à l'autre de ces composantes.

Quelquefois un pilier sépare deux travées dont les câbles sont fixés à son sommet. Dans ce cas, la tension de chaque câble se décompose en deux forces, l'une verticale et l'autre horizontale; les forces verticales s'ajoutent, et le pilier doit résister à leur somme sans s'écraser; les forces horizontales se retranchent, et leur différence ne doit pas être suffisante pour faire tourner le pilier autour de l'arête extérieure de sa base, c'est-à-dire que le moment de cette différence, pris par rapport à cette arête, doit être moindre que celui du poids du pilier, augmenté de celui de la somme des composantes verticales des tensions, pris également par rapport à cette même arête. Il ne faut pas non plus que cette force horizontale soit suffisante pour faire glisser le pilier sur sa base ni sur aucun de ses joints. Pour éviter ce dernier glissement, on relie toutes les assises du pilier par quatre tirants en fer qui s'élèvent du bas du pilier jusqu'au sommet, où ils se boulonnent sur la plaque de fonte qui porte les chevalets auxquels sont fixés les câbles.

Il faut aussi que la résultante des tensions ne soit pas suffisante pour faire rompre les piliers suivant sa direction. Pour éviter cela, quand cette résultante est considérable, il convient de relier entre elles les pierres d'une même assise par des crochets et des ancres horizontales. La section du pilier étant suffisante pour résister à la composante ver-



ticale des tensions, on peut dire que l'on n'a pas à craindre cette rupture oblique suivant la direction de la résultante, tant que cette direction ne passe pas hors de la base du pilier.

Pour évaluer la composante horizontale qui tend à renverser le pilier, on suppose que l'une des travées du pont est chargée de 200 kilog. par mètre carré de tablier, et qu'aucune surcharge ne repose sur l'autre; ce cas est le plus défavorable, mais il se présente. La pierre des piliers ne doit pas travailler sous une pression supérieure à celle indiquée n° 213, et même dans quelques ponts, au pont de Fribourg, par exemple, on a réduit la charge à 1 kilog. seulement par centimètre carré; dans les ponts construits avec de la pierre ordinaire, les voussoirs travaillent souvent à 20 kilogrammes par centimètre carré.

Dans quelques ponts, on a substitué aux piliers en pierre des bielles en fonte placées chacune dans la direction de la résultante des tensions des deux parties du câble qui s'infléchit sur son sommet.

643. *Massif d'amarrage.* La chaîne de retenue, arrivée au sol, y pénètre en ligne droite, ou ordinairement en s'infléchissant de nouveau afin de diminuer la longueur du massif d'amarrage, qu'alors on relie facilement à la culée de manière à ne faire qu'un massif de leur ensemble. Dans les ponts où les culées avancent de manière à être isolées, le plus souvent chaque massif d'amarrage se relie à la culée par un des murs en retour; par cette disposition, la maçonnerie de ces murs est doublement utilisée.

Quelle que soit la forme du massif, son ensemble doit être suffisant pour résister à la tension T qui le sollicite suivant As (fig. 33, pl. III).

Supposons d'abord que la chaîne de retenue ne s'infléchisse pas au point A, et soit β l'angle que fait sA avec la verticale et P le poids du massif. La tension T se décompose en deux forces: l'une, $T \cos \beta$, laquelle, étant verticale, tend à soulever le massif de maçonnerie, et par conséquent à diminuer la pression et par suite le frottement de celui-ci sur sa base; l'autre, $T \sin \beta$, laquelle, étant horizontale, tend à faire glisser le massif sur sa base.

Pour que le massif ne soit pas soulevé, il faut que l'on ait

$$T \cos \beta < P.$$

Pour que le massif ne glisse pas, on doit avoir

$$T \sin \beta < 0{,}76\,(P - T \cos \beta).\ ^{*}$$

De plus, la tension T doit être moindre que la résultante, suivant sa direction, du poids P et de la résistance au glissement $0{,}76\,(P - T\cos\beta)$.

0,76 est le coefficient de frottement du massif sur sa base; on doit négliger l'adhérence des mortiers, ceux-ci n'étant ordinairement pas entièrement secs lors de l'essai du pont (61 et 629).

Lorsque la chaîne s'infléchit, il faut placer le point d'inflexion dans le sol, afin de diminuer la tendance des assises supérieures à glisser. Le massif doit satisfaire aux conditions du cas précédent, et de plus la résultante des tensions des parties A*s* et AE de la chaîne de retenue doit être insuffisante pour renverser la culée. Ordinairement la direction de cette résultante, qui divise l'angle des deux parties A*s* et AE en deux parties égales, passe dans la base de la culée et ne tend pas à renverser le massif, si toutefois la fondation est assez solide pour que l'arête de la culée n'y pénètre pas.

Quoique la chaîne de retenue soulève une grande partie du massif d'amarrage, il n'en faut pas moins faire la fondation très-solide, parce que le massif étant plus fortement soulevé en des points de sa base qu'en d'autres, les affaissements inégaux sont à craindre.

La partie de câble placée dans le sol étant plus sujette à l'oxydation, il conviendrait de la faire en fer forgé; dans tous les cas, on doit avoir soin de la couvrir de vernis. Comme, pour la solidité, on est obligé de faire étroites les cheminées de passage des câbles, et que par suite on ne peut aller vérifier l'état de ceux-ci, il convient de remplir les cheminées de chaux grasse réduite en pâte, et de placer une couche de suif sur la surface de la chaux; par cette disposition, tout le métal étant privé d'air, il se conserve bien. Les cheminées ont de $0^m,08$ à $0^m,12$ de hauteur sur une largeur proportionnée à celle des faisceaux de câbles (641).

La clavette qui retient l'extrémité du câble s'appuie sur une plaque de fonte; cependant des constructeurs la font directement reposer sur la pierre, mais alors il faut avoir bien soin de proportionner ses dimensions de manière qu'elle n'écrase pas la pierre sur laquelle elle est placée. Il faut avoir soin d'éviter de reposer la plaque de fonte ou la clavette sur du bois, dont la prompte pourriture amènerait la chute du pont. On ménage dans le massif une cheminée verticale, qui permet d'aller constater à volonté l'état de la clavette d'amarrage. Une petite chambre réservée en dessous de la clavette permet d'y faire les réparations qui peuvent être nécessaires.

644. *Planchers.* Les planchers reposent sur des poutres, ordinairement en bois, supportées à chaque extrémité par une tige; ces poutres sont espacées de $1^m,25$ à $1^m,50$ environ. La partie de tablier qu'elles supportent et la surcharge provenant des plus fortes voitures guident pour en fixer les dimensions; le cas le plus défavorable est celui où on suppose la moitié du poids de la partie de tablier qui y correspond appliquée en son milieu, ainsi que celui de la plus forte voiture (219). Il convient de remarquer que le plancher reporte, dans ce cas défavorable, une partie de la charge sur les poutres voisines.

Toutes les poutres sont reliées entre elles par quatre longrines, qui servent en même temps à surhausser les trottoirs, et par les madriers

du premier plancher. Des contrevents en fer ou en bois empêchent le système de faire parallélogramme dans le sens horizontal.

Dans quelques ponts on a recouvert la face supérieure des poutres d'une plaque de zinc mince, qui empêche la pénétration de l'eau et contribue à la conservation du bois.

Les madriers du premier plancher ont de $0^m,10$ à $0^m,12$ d'épaisseur, et on les espace de quelques centimètres pour que l'air circule le mieux possible entre eux. Le plancher supérieur a $0^m,05$ à $0^m,06$ d'épaisseur; les pièces en sont jointives et placées suivant la largeur du pont, afin que les pieds des chevaux y trouvent des appuis. On laisse entre les extrémités des pièces de ce tablier et les longrines qui supportent les trottoirs un jeu de quelques centimètres, afin que les eaux trouvent un écoulement facile.

La largeur d'un pont suspendu dépasse rarement 8 mètres; au delà les poutres exigent des dimensions trop fortes. Sur ces 8 mètres, on prend $4^m,80$ pour la chaussée, ce qui est nécessaire pour que deux voitures se croisent, et le reste est employé en trottoirs. Lorsque le pont est peu fréquenté et d'une faible longueur, on ne donne au passage des voitures que $2^m,20$ à $2^m,40$ et de 1 mètre à $1^m.10$ à chaque trottoir; la largeur d'un tel pont, sur lequel les voitures ne se croisent pas, n'a jamais été de moins de $4^m,40$.

Si une largeur de 8 mètres n'était pas suffisante, on pourrait placer les trottoirs à l'extérieur des tiges de suspension, sauf à supporter, si cela était nécessaire, un côté de chacun d'eux par un câble séparé du faisceau supportant la chaussée et son autre côté.

645. *Garde-corps.* Quoique les garde-corps en bois enlèvent de la largeur au pont, il convient de les employer à cause de la rigidité qu'ils communiquent au plancher; c'est aussi pour mieux atteindre ce but qu'on les forme d'une suite de croix de Saint-André. Leur hauteur varie de $0^m,90$ à 1 mètre.

646. *Appareils employés pour l'exécution des travaux sous l'eau.* Pour enlever du fond de l'eau une pierre ou tout autre objet analogue, on se sert d'une tenaille dont l'axe d'articulation des mâchoires est fixé à l'extrémité d'un long manche. Les mâchoires se prolongent au-dessus de l'articulation par des tiges formant avec d'autres un parallélogramme dont tous les côtés sont égaux et articulés. Une corde fixée au sommet supérieur du parallélogramme, et s'élevant le long du manche jusque hors de l'eau, permet, en la tirant, de serrer entre les mâchoires de la tenaille l'objet qui s'y trouve, et que l'on peut alors élever à la surface de l'eau.

Pour creuser le sol sous l'eau on fait usage soit de la drague à main, soit de la drague à chapelets munis de hottes à griffes, laquelle est mue par des animaux ou par la vapeur.

La *cloche de plongeur*, employée pour retirer du fond de l'eau des

corps qui y sont tombés, ou même pour y faire des travaux de démolition ou de construction, consiste en un vase ouvert par le bas, fermé sur toutes les autres faces, et dans lequel des hommes peuvent travailler à des profondeurs considérables sous l'eau.

La cloche de plongeur, telle qu'elle a été perfectionnée par Rennie, et telle qu'elle est encore employée en Angleterre, a à peu près la forme d'un parallélipipède. Sa largeur est de 1m,58 et sa hauteur extérieurement est de 1m,85 sur 1m,72 intérieurement. Ses dimensions vont un peu en augmentant depuis le haut jusqu'en bas. On la coule en fonte d'un seul jet, en faisant ses parois assez épaisses pour éviter toute fissure, même en cas d'accident, et pour que son poids soit suffisant pour qu'il ne soit pas nécessaire de la lester pour la submerger quoique pleine d'air. Au sommet de la cloche est pratiquée une ouverture communiquant avec l'intérieur par plusieurs trous, également circulaires, et fermés par autant de soupapes en cuir s'ouvrant de haut en bas. Un fort tuyau de cuir vissé sur l'ouverture extérieure s'élève jusqu'à la pompe foulante placée sur l'échafaud ou le bâtiment duquel on manœuvre la cloche; celle-ci est suspendue à de fortes chaînes engagées dans des anneaux en fer emprisonnés dans le corps de la cloche au moment de la fusion.

L'intérieur de la cloche est éclairé à l'aide de 12 lentilles circulaires en verre très-épais, solidement fixées par des écrous et du mastic sur le pourtour de la face supérieure.

La cloche contient aisément deux personnes assises sur des siéges convenablement placés. Le poids total de l'appareil est d'environ 4000 kilog. La pompe foulante qui fournit l'air est ordinairement manœuvrée par 4 hommes. Pour que l'air de la cloche n'ait aucune influence fâcheuse sur la santé des ouvriers, il faut qu'il renferme au plus 4 à 5 pour 100 d'air vicié; pour obtenir ce résultat, la pompe doit renouveler 4 à 5 mètres cubes d'air par heure et par homme. L'air vicié par la respiration étant plus chaud et par suite moins dense que l'air frais, il s'accumule au haut de la cloche, d'où on l'expulse à l'aide d'un robinet.

A mesure que la cloche s'enfonce sous l'eau et que la pression de l'air y devient plus considérable, les plongeurs ressentent dans les oreilles une douleur assez vive, qu'ils font disparaître en opérant dans la bouche, celle-ci et les narines étant bouchées, un mouvement de déglutition, ou en avalant leur salive.

Lorsque l'eau est limpide, la lumière est très-grande sous la cloche. Les signaux sont communiqués le plus souvent par les plongeurs, aux personnes qui manœuvrent la cloche, au moyen de coups de marteau frappés contre les parois de celle-ci, et ils n'en exigent généralement qu'un petit nombre.

Pour extraire des pierres qui gisaient au fond du port de Cherbourg,

on a fait usage d'une cloche, que son inventeur, M. le docteur Payène, appelle *bateau-plongeur*. Cet appareil, dont la forme se rapproche de celle d'un bateau, est divisé, par des cloisons à peu près verticales, en trois compartiments, dont celui du milieu est divisé en deux chambres par une cloison horizontale garnie d'une porte qui permet aux ouvriers de passer de l'une des chambres dans l'autre; la chambre inférieure est sans fond.

Avant l'immersion, on comprime de l'air dans les compartiments extrêmes, et les plongeurs s'enferment dans la chambre supérieure. Cela fait, on foule de l'eau dans les compartiments extrêmes, dont l'air se rend dans la chambre intermédiaire supérieure, et par suite de l'augmentation de poids due à cette eau, l'appareil s'immerge progressivement. Arrivé sur le fond, on ouvre la porte de la cloison horizontale, l'air comprimé refoule l'eau de la chambre inférieure, et les ouvriers y descendent pour travailler.

On maintient l'air de l'appareil à l'état respirable en le faisant passer, à l'aide d'un fort soufflet, dans une dissolution alcaline. La tuyère de ce soufflet est garnie d'une pomme d'arrosoir, laquelle en divisant l'air en petits filets le met mieux en contact avec la dissolution.

Le *scafendre*, imaginé par M. Siébe, est un appareil que le plongeur porte lui-même, et qui le laisse assez libre de ses mouvements pour qu'il puisse procéder à des opérations de sauvetage, et même exécuter sous l'eau, à des profondeurs considérables, des ouvrages de construction ou de restauration. Le remplacement de l'air vicié par l'air pur se faisant au moyen d'une pompe fonctionnant avec beaucoup de régularité, l'ouvrier peut facilement rester sous l'eau pendant 3 à 4 heures et même plus.

Le scafendre a été appliqué pour visiter et construire quelques parties de fondation des piles du pont de Beaucaire, sur le Rhône, pour le chemin de fer de Marseille à Nîmes; aux ponts de Cette et de Marseille, on s'en sert fréquemment pour visiter l'état des fondations et y exécuter des réparations. M. Laroque, après avoir fait faire une partie de revêtement en ciment de Vassy, à une profondeur de 4m,50 sous l'eau, au fort de la Joliette, pour s'assurer de l'état du travail, a fait lui-même une descente sous-marine, et il reste convaincu que l'on peut tirer un très-bon parti du scafendre dans l'exécution des grands travaux hydrauliques; il est fâcheux que son prix soit aussi élevé (6500 à 7000 francs).

Le scafendre se compose :

1° D'une pompe à air contenue dans une caisse de 0m,60 à 0m,80 de côté, dont le poids est de 125 kilog. environ;

2° D'une autre caisse contenant des souliers plombés, des plaques de plomb et des vêtements de laine, tels que camisoles, caleçons, bas et bonnets;

3° D'un vêtement imperméable en caoutchouc d'une seule pièce, qui

part du milieu du dos et couvre tout le corps en formant un pantalon à bas;

4° D'une épaulière en métal, dont le collet circulaire porte un pas de vis, et la partie inférieure un système de bandelettes en cuivre qui sert à fixer le haut du vêtement imperméable;

5° D'un casque en métal, de forme ovoïde, dont la hauteur est de 0m,35 et la largeur 0m,27. La partie inférieure du casque, à la hauteur du col, est ouverte circulairement, et porte un écrou en métal qui s'adapte au pas de vis de l'épaulière et permet la réunion complète du casque au vêtement imperméable. La face du casque est munie à la hauteur des yeux de deux carreaux fixes en verre fort épais de 0m,13 de diamètre; à la hauteur de la bouche existe aussi un carreau mobile de même diamètre, qui est placé dans un châssis en métal formant le pas d'une vis dont l'ouverture du casque forme l'écrou; une rainure tient ce verre très-fixe, et on peut très-facilement le retirer, ce qui permet au plongeur de respirer librement sitôt sa sortie de l'eau.

Les carreaux sont préservés par des petites grilles en métal. Le conduit d'aspiration d'air pur et celui de décharge de l'air vicié sont formés à l'intérieur du casque par de petits canaux placés autour des carreaux; l'air pur arrive par le dessus et derrière la tête; le casque est muni à cet effet d'un pas de vis qui reçoit l'écrou d'un tuyau en caoutchouc de 0m,035 de diamètre, au moyen duquel la pompe envoie l'air pur; l'air vicié sort par une petite soupape placée sur le derrière du casque et dont la jonction s'opère sans permettre à l'eau de rentrer.

Pour se revêtir du scafendre il faut procéder comme il suit :

On se revêt d'abord d'une camisole de grosse laine, d'un caleçon et d'une paire de bas de même étoffe, il faut mettre deux paires de bas si la température le requiert; ensuite on endosse le vêtement en caoutchouc, qu'il faut avoir soin de placer auprès du feu afin qu'il se ramollisse dans le cas où il serait roide; sans cette précaution, on pourrait couper le caoutchouc. Ces vêtements mis, on pose sur ses épaules un coussin-couronne qu'on fait passer par-dessus la tête, et on passe ensuite la tête dans l'épaulière ou collet du casque, qu'on raccorde au vêtement imperméable, en serrant fortement avec une clef les 13 écrous. Les mains sont entièrement libres, et afin que l'eau ne s'introduise pas par les poignets du vêtement imperméable, on les lie étroitement avec de larges bandelettes en caoutchouc, en ayant bien soin de placer des linges entre la peau et le vêtement; on met une nouvelle paire de bas par-dessus le vêtement, qui doit être aussi recouvert d'un surtout en toile à navire, dont le but est de le garantir de l'usure qui pourrait résulter du frottement et des chocs.

Le plongeur se garnit ensuite les pieds de forts souliers à semelles de plomb, il se recouvre la tête d'un gros bonnet de laine qu'on doit bien lui appliquer sur les oreilles, ce qui est urgent (il serait même bon de

boucher ces dernières avec du coton). Dans cet état, on lui recouvre la tête du casque, sans placer le verre mobile de face; le casque est vissé sur l'épaulière de manière que le tube à air revienne sous le bras gauche, sur le devant du plongeur; on lui attache autour du corps et sur le devant de l'épaule droite le cordage de signal et de sauvetage. On maintient le tube à air serré contre le corps par une ceinture à laquelle est adapté un étui, contenant un couteau qui sert à trancher ce qui pourrait arrêter ou embarrasser le plongeur; on place des plaques de plomb, l'une sur le devant, l'autre sur le derrière; la corde qui les fixe doit enfiler les brides qui existent sur le casque, et après avoir passé par les poids elle est retenue par devant au moyen d'un nœud coulant.

Sur le ponton ou le quai d'où le plongeur doit descendre, on place le tuyau d'aspiration en forme de serpentin, de manière qu'il ne puisse se rouler et interrompre le passage de l'air; on adapte à la pompe une extrémité du tuyau et l'autre au casque, et on essaye si la pompe fonctionne bien. Lorsque tout est bien disposé, et que le plongeur est prêt à descendre, on visse sur le devant du casque le verre mobile; à partir de ce moment la pompe à air ne doit pas cesser de fonctionner, car quoique le plongeur ne soit pas dans l'eau, il est entièrement privé d'air puisque celui-ci ne peut plus lui arriver que par le tube du casque.

Avant de descendre dans l'eau, le plongeur fait régulariser le mouvement de la pompe suivant ses besoins, en faisant signe aux pompeurs d'agir plus ou moins vite suivant qu'il n'a pas assez ou qu'il a trop d'air. Le premier cas se fait sentir par l'arrivée des sueurs, des étouffements et des crampes d'estomac, alors la pompe doit fonctionner plus vite; il doit en être autrement si le plongeur ressent de forts sifflements d'oreilles et des espèces de frissons.

La descente dans l'eau se fait au moyen d'une échelle fixée au fond par un lest. Les effets qui suivent l'immersion complète du plongeur sont d'abord un très-fort bourdonnement d'oreilles, un assourdissement de tous bruits extérieurs, et une obscurité presque complète, qui cesse au bout de quelques minutes de séjour sous l'eau.

Si le plongeur s'éloigne à une grande distance de l'échelle, il doit y attacher une ficelle qu'il tient à sa main et qui lui permet de retrouver son chemin; il doit se munir aussi d'un levier qui lui sert d'appui, et de plus avoir soin de marcher de préférence à reculons, en tâtant s'il fait obscur; il doit se mouvoir lentement et dans des sens déterminés, afin de ne pas s'embarrasser dans le tube ou le cordon, et aussi pour éviter de briser les verres du casque en les cognant contre quelques pointes dures.

Deux hommes de confiance doivent être placés là où est descendu le plongeur pour observer soigneusement le cordon de signal et le tube de respiration, qui doit toujours être modérément tendu; la surveil-

lance de ces hommes doit être de toute confiance, on ne doit leur permettre aucune conversation qui pourrait distraire leur attention des signaux ou de toute autre circonstance. Si par la corde, qu'ils ne doivent pas quitter, ils sentent la moindre secousse due à une chute ou à tout autre accident, ils doivent hâler de suite le plongeur, en veillant à ce qu'il n'y ait aucune interruption dans la pompe. Aussitôt la tête hors de l'eau, le premier soin doit être de dévisser le verre mobile du casque, afin que le plongeur puisse respirer à l'aise.

Les surveillants doivent aussi signaler de temps en temps au plongeur que tout va bien; ce dernier doit leur répondre; dans le cas contraire il faut le hâler. Les signaux se font en tirant la corde de sauvetage un certain nombre de fois convenu, en raison de la nature du travail. Le plongeur peut aussi correspondre avec les surveillants en écrivant ce qu'il désire sur une ardoise fixée à l'extrémité d'une corde; les surveillants lui répondent par le même moyen.

Nous terminons ces indications sur le scafendre en engageant à suivre avec une scrupuleuse attention les indications données par M. Siébe pour l'entretien de ses appareils; car si on négligeait de les nettoyer ou de les entretenir quand ils sont en magasin, il en résulterait des avaries qui les mettraient promptement dans l'impossibilité de pouvoir servir.

Encaissement à revêtir. Avec cet appareil, on est parvenu à faire, à plusieurs mètres sous l'eau, au moyen du ciment de Vassy, et sans épuisements, des revêtements d'une épaisseur de 0m,10 à 0m,20, qui ont une parfaite adhérence avec les maçonneries restaurées, et qui présentent un parement droit et uni comme s'ils avaient été faits hors de l'eau avec la truelle.

De l'avis de MM. les ingénieurs qui se sont le plus spécialement occupés des effets produits par l'eau de mer sur les matières qui entrent dans la composition des mortiers hydrauliques (535), et entre autres MM. Vicat et Féburier, le moyen à adopter pour préserver les maçonneries en mortiers douteux consiste à faire, avec le plus grand soin, sur les parements, des revêtements ou des rejointoiements de 0m,05 à 0m,06 de profondeur, avec des ciments inattaquables par l'eau de mer, tels que ceux de Vassy et de Parker.

L'exécution de ces travaux préservatifs, assez simple pour des constructions neuves en cours d'exécution, présentait, pour la restauration des ouvrages, des difficultés qui se sont aplanies par l'usage du scafendre et de l'encaissement à revêtir; c'est ce qu'ont démontré les revêtements sous-marins en ciment de Vassy exécutés par M. Gariel dans les ports de la Méditerranée, en France et en Algérie.

L'encaissement à revêtir est formé de deux poteaux en bois, d'une longueur supérieure à la profondeur de l'eau, et espacés d'environ 2m,00 d'axe en axe. Ces poteaux sont réunis à leur partie inférieure par une traverse horizontale, et le long de chacun d'eux est fixée une tige en

fer de $0^m,015$ de diamètre. La paroi de l'encaissement destinée à former le parement du revêtement se compose d'une série de madriers en chêne de $0^m,035$ d'épaisseur et $0^m,25$ à $0^m,30$ de largeur, dont chacun est garni à ses extrémités d'un piton à vis, lequel, en glissant le long des tiges en fer, fait que tous les madriers se superposent sur toute la hauteur des poteaux en formant une surface unie.

Avant de poser l'encaissement, on procède à la préparation des surfaces à revêtir ou des parois des affouillements à remplir, c'est-à-dire qu'on les dégrade ou qu'on les pique au vif pour les dépouiller des mousses et lichens. Cette opération s'exécute au moyen de longues barres à mine appointées, et de brosses de chiendent ou de balais adaptés à des manches assez longs pour atteindre le fond de l'eau. On dépouille ensuite le pied de la paroi des résidus du dégradage ou des autres matières qui y sont accumulés, en se servant de râteaux en fer ou de dragues à main.

On place alors la ferme de l'encaissement, qui descend verticalement dans l'eau, la traverse inférieure étant lestée au moyen de moellonnaille maintenue par des planches fixées contre les poteaux, du côté opposé au revêtement à exécuter. On amène la charpente de manière que quand les madriers seront en place leur face intérieure coïncide avec le parement que l'on veut obtenir; alors on la fixe solidement dans cette position au moyen d'amarres; puis, si le parement a partout la même épaisseur, on place tous les madriers de l'encaissement; dans le cas contraire, ou s'il y a des vides à remplir, on ne pose qu'un ou deux madriers à la fois, et on fait au fur et à mesure la partie correspondante du revêtement.

Le remplissage entre l'encaissement et le mur, c'est-à-dire l'exécution proprement dite du revêtement, se fait au moyen de la pelle à couler, instrument particulier à ce genre de travail, et qui est formé d'une lame de tôle de $0^m,45$ de côté, qui se relève sous un certain angle à partir d'environ la moitié de sa longueur, et qui est garnie d'une joue en retour d'équerre le long d'une arête longitudinale. Ce relèvement de l'extrémité de la joue suffit pour maintenir sur la pelle la matière que l'on descend dans l'encaissement. La saillie de la joue plus l'épaisseur du manche doit être égale à l'épaisseur la plus faible du revêtement, afin que la pelle puisse circuler partout avec la plus grande charge possible. La pelle à couler est garnie d'un pilon, dont le manche est aussi long que celui de la pelle, lequel doit sortir de $1^m,50$ au moins de l'eau lorsqu'on travaille au fond de l'encaissement.

Ayant placé la pelle horizontalement, l'ouvrier la garnit de mortier de ciment et de cailloux concassés, en couvrant, sur toutes les faces vues, cette espèce de béton par un enduit de $0^m,02$ d'épaisseur arasant la joue de la pelle. Ce garnissage de la pelle doit se faire avec rapidité,

afin que l'immersion ait lieu au moment où le ciment commence à prendre, ce qui arrive parfois après une ou deux minutes.

La pellée étant bien régulièrement préparée, on la descend verticalement et avec précaution entre l'encaissement et le mur, en faisant glisser le manche contre les madriers; arrivée à la profondeur voulue, l'ouvrier incline le manche vers lui de manière à rendre l'extrémité de la pelle à peu près verticale, et soulevant légèrement la pelle, le contenu s'en détache facilement; avec le pilon on le régularise et on le fait adhérer à la paroi du mur et à la partie de parement déjà faite. Le pilon doit faire le nécessaire sans délayer le mortier; sa manœuvre étant faite avec beaucoup de précaution, elle ne produit qu'une laitance presque insensible avec un mortier très-gras, de trois parties de ciment de Vassy pour deux de sable.

Quand l'encaissement est garni jusqu'au niveau de l'eau, on le déplace pour le reposer à la suite et exécuter une nouvelle portion du revêtement.

Malgré les difficultés d'exécution, avec des ouvriers habiles, soigneux et exercés comme ils doivent l'être, les revêtements en ciment de Vassy se font avec beaucoup de célérité. Ainsi, pour le revêtement des fondations de la batterie Aljefna, à Alger, un atelier composé de 6 dégradeurs, 2 plongeurs, 3 poseurs, 3 gâcheurs de ciment et 2 manœuvres, en tout 16 ouvriers, faisait en moyenne deux longueurs d'encaissement par journée de 12 heures; la profondeur d'eau était de 2^m,00 à 2^m,50, ce qui formait une surface de 5 à 6 mètres carrés pour les deux encaissements.

CANAUX.

647. *Division des canaux.* Un canal construit latéralement à une rivière, que la pente, les sinuosités du lit et le régime des eaux ne permettent pas de rendre économiquement navigable, prend le nom de *canal latéral*. Un canal destiné à établir une communication entre deux cours d'eau navigables est appelé *canal à point de partage.*

CANAL LATÉRAL.

648. *Tracé.* Un canal latéral a sa pente dans le même sens que le cours d'eau qu'il longe, et il suit constamment la même vallée. Sa position doit être choisie telle, qu'il conserve l'eau nécessaire à la navigation, que le cours de la rivière ne puisse pas le dégrader, et que les dépenses en acquisitions de terrain et en travaux soient les moindres possibles.

Lorsque le sol de la vallée est de gravier plus ou moins pur, comme cela arrive souvent, ce sol étant très-perméable, on doit tâcher de placer le canal sur un sol végétal, en se rapprochant des coteaux ; il est évident que l'on doit chercher à l'adosser à celui des coteaux qui est le moins abrupte, le moins couvert d'habitations, celui dont le sol est le moins perméable et le plus facile à travailler. Il faut éviter de faire passer un canal d'une rive sur l'autre, cette disposition entraînant dans des inconvénients pour la navigation et des dépenses considérables de construction.

Lorsqu'on établit un canal sur un sol graveleux couvert d'une couche de terre végétale, il faut avoir soin de ne pas enlever toute cette dernière, qui est plus ou moins imperméable ; on ferait des emprunts de part et d'autre de l'emplacement du canal pour établir les digues, en ayant soin de placer les terres dans les parties en contact avec l'eau, et le gravier derrière ces terres.

La quantité d'eau dépensée dans un canal devant être la plus faible possible, il faut éviter de donner écoulement à l'eau. Aussi doit-on composer le canal de parties horizontales placées l'une à la suite de l'autre, à des étages différents, afin de racheter la pente du terrain, et d'éviter les grands travaux de construction en se rapprochant le plus possible de la surface du sol. On maintient l'eau à un niveau convenable dans ces différentes parties du canal à l'aide de portes d'écluses, et, afin de dépenser le moins d'eau possible au passage d'un bateau d'un bief dans un autre, on place dans le bief inférieur une seconde porte d'écluse, éloignée de la première d'une distance au moins égale à la longueur du bateau. La partie de canal ainsi comprise entre deux portes prend le nom de *sas*. En ouvrant la porte d'amont, le niveau de l'eau s'établit dans le sas et le bief supérieur, et permet de faire passer un bateau de ce bief dans le sas ; ouvrant ensuite la porte d'aval, l'eau dans le sas descend jusqu'au niveau du bief d'aval, et alors le bateau passe dans ce bief.

Pour faire passer un bateau d'un bief dans le bief supérieur, on procède de la même manière, mais en commençant d'abord par ouvrir la porte d'aval.

Comme il est impossible d'ouvrir les portes tant qu'il existe une différence de charge considérable sur leurs deux faces, on établit au bas de chacune d'elles une petite vanne, appelée *ventelle*, qui permet d'établir le niveau de l'eau sur les deux faces de la porte avant de l'ouvrir. La queue de la ventelle s'élève jusqu'au haut de la porte, de manière qu'on puisse lui communiquer le mouvement à l'aide d'un cric, d'une vis, ou d'un levier simple ; on est revenu à ce dernier moyen, qui demande moins de temps pour la manœuvre que le cric, qui est ordinairement employé, et surtout que la vis, que l'on a à peu près abandonnée (639).

Lorsque le canal est placé sur un sol dont la pente est à peu près uni-

forme, comme cela a lieu dans une vallée, en donnant aux écluses une forte chute, on serait conduit à des dépenses considérables pour creuser l'amont de chaque bief et remblayer l'aval. Quand le canal latéral est adossé à un coteau d'une pente douce, il faut, autant que possible, se placer de manière que les déblais de la *cunette* compensent les remblais des digues, et donner aux écluses la chute la plus convenable, de 2^m,50 à 3 mètres.

649. *Section transversale.* La largeur du fond d'un canal se fait à peu près égale au double de celle des bateaux qui le fréquentent; ainsi, selon que les écluses ont de 5^m,20 à 6^m,50 d'ouverture, la largeur du plafond se fait de 10 mètres à 12 mètres. Au pont-canal de Saint-Florentin, sur l'Armance, formé de cinq arches de 5^m,80 de largeur chacune, la largeur est de 10^m,10, savoir : 2^m,45 pour chaque banquette et 5^m,20 pour le canal; cette dernière dimension est celle des écluses et suffit au passage des bateaux.

La profondeur d'eau est de 1^m,50 pour plusieurs canaux, et elle est de 1^m,65 à 2 mètres pour d'autres; dans tous les cas, cette profondeur doit être en rapport avec le tirant d'eau des bateaux qui fréquentent le canal.

Les talus intérieurs sont ordinairement à 1 et 1/2 de base pour 1 de hauteur, et, afin que le batillage de l'eau ne les dégrade pas, le plus souvent on établit sur chacun d'eux, au niveau de l'eau, une petite *risberme* de 0^m,25 à 0^m,30, sur laquelle on plante des glaïeuls.

Les chemins de halage ont de 3 à 6 mètres de largeur, selon la nature du sol sur lequel ils sont établis et l'importance des trains halés. Ils sont ordinairement placés à 0^m,50 au-dessus du niveau de l'eau, et quelquefois à 0^m,75 ou 1 mètre.

650. *Alimentation.* Ordinairement l'alimentation d'un canal latéral n'offre aucune difficulté; la prise d'eau se fait dans la rivière qu'il longe, et les ruisseaux tributaires de la rivière réparent de distance en distance les pertes dues aux infiltrations et à l'évaporation. On a cependant quelquefois éprouvé des difficultés; ainsi le canal du Rhône au Rhin, quoique alimenté par une rigole navigable prenant 20 mètres cubes d'eau par seconde dans le Rhin, n'a pendant longtemps offert qu'une navigation incommode. Cela tient à ce que le canal est creusé sur un sol de gros gravier très-perméable; mais comme on introduit une eau boueuse, les pertes de la rigole ont diminué de jour en jour.

CANAUX A POINT DE PARTAGE.

651. *Tracé.* Le tracé d'un canal à point de partage exige une étude approfondie, soit pour son alimentation, soit pour déterminer le point

bas de la chaîne de montagnes qu'il doit traverser; c'est en ce point bas qu'il y aura le plus de chances de pouvoir se procurer les eaux nécessaires à la navigation. C'est d'après les considérations posées au n° 584 que l'on détermine le point bas.

Les sources d'eau se trouvant toujours à une certaine profondeur au-dessous de la surface du sol, ce n'est que par des tranchées ou même des souterrains que l'on pourra se procurer, au point de partage des deux branches du canal, la quantité d'eau nécessaire à la navigation. Malgré ces souterrains et ces tranchées, sauf le cas très-rare où le point bas se trouve au-dessous d'une assez grande étendue de terrain pour produire des ruisseaux ou des sources abondantes, on est obligé d'accumuler dans des réservoirs les eaux de pluie, afin de pouvoir en disposer pendant les sécheresses.

La dimension de ces réservoirs dépend du volume d'eau à fournir et de la plus ou moins grande rareté des pluies. La quantité d'eau qui afflue dans ces réservoirs dépend de l'étendue du terrain tributaire, des infiltrations, de la vaporisation et de l'absorption par la végétation. Il est impossible de tenir compte de toutes ces circonstances; tout ce que l'on peut faire est d'admettre, avec quelques ingénieurs, que les cours d'eau écoulent les 3/7 du produit annuel des pluies. En France, ce produit annuel est de 0m,70; mais il convient d'observer qu'il tombe plus d'eau dans le Midi que dans le Nord, et dans les parties élevées d'un même pays que dans les plaines (605). D'après Gauthey, au canal du Midi, la superficie du terrain dont les eaux se déversent au point de partage est de 18000 hectares; au canal de Bourgogne, 19200 hectares; au canal de Briare, 29700, et au canal du Centre, 30800.

Le réservoir de Grosbois, canal de Bourgogne, a une capacité de 8000000 mètres cubes; sa profondeur est de 15 à 18 mètres. Celui de Saint-Ferréol, canal du Midi, contient 6956000 mètres cubes; la plus grande profondeur d'eau y est de 32m,50. Ces réservoirs s'obtiennent en barrant, au moyen d'une digue, l'endroit le plus resserré d'un vallon.

652. *Quantité d'eau à fournir à un canal.* Cette quantité doit compenser: 1° les pertes par évaporation, 2° par infiltration, 3° par les portes des écluses, 4° celles dues aux passages des bateaux dans les écluses, 5° celles dues au remplissage du canal après la mise à sec par suite des réparations annuelles. Il est évident que c'est surtout pour les parties voisines du point de partage qu'il faut s'assurer que les eaux affluentes compensent les pertes; car, à mesure que le canal descend, les ruisseaux tributaires deviennent plus nombreux et plus considérables.

653. *Évaporation.* La quantité d'eau évaporée dépend de la température et de toutes les circonstances atmosphériques; en général on a trouvé qu'elle était de 1mc,50 par année ou de 0mc,004 par jour, par mètre carré de surface d'eau.

654. *Infiltration.* On admet que la quantité d'eau absorbée par infiltra-

tion est double de celle évaporée; au reste cette quantité varie selon la nature du terrain, et, étant considérable à l'ouverture d'un canal, elle diminue chaque année. En rapportant les remblais, il faut avoir soin de labourer la terre sur laquelle on les pose, afin de rendre la liaison complète et diminuer les chances d'infiltration.

Sur un pont-canal, où il faut prendre les plus grandes précautions pour éviter les infiltrations, après le décintrement des voûtes, on les recouvre d'une couche de béton de $0^m,25$ à $0^m,30$ d'épaisseur; mais jusqu'à présent on n'a obtenu un effet tout à fait efficace qu'en dallant le fond et les parois de la cunette en laves de Volvic, et en recouvrant ce dallage de deux couches d'enduit de bitume. Le bon emploi que l'on fait aujourd'hui du ciment romain permet de substituer cette matière au dallage (529).

655. *La perte due aux portes d'écluses* dépend du soin apporté à la construction. Il paraît qu'en général on est au-dessus de la réalité en supposant que cette perte équivaut annuellement à la quantité d'eau que nécessiterait le passage de sept ou huit bateaux.

656. *Perte due au passage d'un bateau.* Lorsqu'un bateau monte, son passage d'un bief dans le bief supérieur oblige de faire passer de ce dernier dans le premier un volume d'eau égal à

$$P + B,$$

P volume d'un prisme ayant la section horizontale du sas pour base et la chute de l'écluse pour hauteur;
B volume d'eau déplacé par le bateau.

Quand au contraire le bateau descend, le volume de l'eau passant d'un bief dans le bief inférieur est $P - B$. Il résulte donc que chaque bateau qui monte une branche du canal pour redescendre l'autre, tire du bief de partage un volume d'eau égal à

$$(P + B) + (P - B) = 2P.$$

Lorsque la navigation est active, après avoir fait passer un bateau d'un bief dans le bief supérieur, on utilise l'eau qui remplit le sas pour faire redescendre un autre bateau. Par cette précaution, la quantité d'eau tirée du bief de partage pour deux bateaux allant dans un sens différent n'est que $2P$, ou P par bateau.

Si le bateau remontait vide pour prendre charge au point de partage, à son entrée dans le bief de partage il dépenserait un volume d'eau égal à $P + b$, b étant le volume d'eau déplacé par le bateau à vide; pour sortir du bief, le volume d'eau absorbé serait $P - B$; d'où il résulte que le passage du bateau dans le bief aurait absorbé un volume d'eau égal à $2P + b - B$, volume qui est d'autant plus petit que B est plus

grand et que b est plus petit. Ce cas favorable à l'économie de l'eau ne peut que bien rarement se présenter dans la pratique.

Il est arrivé quelquefois que l'on a été obligé, par suite d'une pente considérable du terrain, de placer plusieurs sas l'un à la suite de l'autre. Pour monter ces sas, il faut autant de prismes P d'eau qu'il y a de sas, plus un volume B ; ainsi, à Fonserane, près de Béziers, où il y a sept sas, le passage d'un bateau montant absorbe un volume d'eau égal à $7P+B$, et celui d'un bateau descendant, un volume égal à $P-B$. Quand tous les sas sont vides, ce qui a lieu ordinairement, il faut encore ajouter à ces dépenses le volume d'eau nécessaire pour faire flotter le bateau dans le premier sas supérieur. Cette disposition des sas accolés est celle qui absorbe le plus d'eau et exige le plus de temps.

657. La cinquième dépense d'eau est facile à calculer, puisqu'elle est égale à la capacité du bief de partage et des biefs placés en amont des premières prises d'eau sur les deux versants.

658. *Construction des sas.* La longueur et la largeur d'un sas doivent être proportionnés aux dimensions des bateaux qui y circuleront. Quant à sa profondeur, elle comprend la hauteur de son couronnement au-dessus du niveau des eaux dans le bief d'amont, la chute ou différence de niveau de l'eau dans les deux biefs, et le tirant d'eau du bateau dans le sas. Le couronnement se tient ordinairement à 0^{m},50 au-dessus du niveau de l'eau. La chute varie de 2^{m},50 à 3 mètres pour les canaux artificiels; pour les écluses que l'on établit sur les rivières, dans les points où la profondeur est insuffisante à la navigation, la chute n'est que de 1 mètre à 1^{m},50 ou 2 mètres.

Une précaution à prendre dans la construction d'un sas, c'est de faire en pierres de taille tout le couronnement et toutes les parties formant des angles verticaux vifs ou arrondis, parce que des petits matériaux ne résisteraient pas aux chocs des bateaux contre ces parties. Ces pierres de taille doivent se relier parfaitement avec les autres parties de la maçonnerie; aussi, pour cela, a-t-on soin que les joints verticaux de chacune d'elles ne correspondent pas aux joints des pierres voisines. Il faut éviter de placer le couronnement en saillie sur le parement des murs ou bajoyers, parce que les bateaux pourraient venir se placer dessous et en ébranler les pierres. La distance d'un joint montant à un angle rentrant ne doit pas être de moins de 0^{m},05, et l'épaisseur horizontale d'une pierre formant un angle saillant doit au moins être égale à la saillie de la pierre.

Afin de pouvoir mettre les sas à sec quand on a à réparer la porte d'amont, on refouille, dans le parement de chacun des bajoyers, en amont de l'écluse d'amont, une coulisse verticale servant à établir un barrage avec des pièces de bois allant d'une coulisse à l'autre. Lorsque les coulisses n'ont que les dimensions ordinaires, 0^{m},15 à 0^{m},20 de profondeur sur 0^{m},20 de largeur, on les refouille ordinairement dans la

pierre; mais pour des dimensions plus grandes, il faudrait, de deux en deux assises, mettre un joint dans la coulisse.

Les *buscs* et les *chardonnets* doivent surtout être faits en pierres de premier choix et de fortes dimensions. Les buscs sont les saillies que l'on établit sur le fond du radier pour y faire contre-buter le bas des portes; on les appareille en voûte, afin qu'ils résistent bien à la poussée. Dans les écluses de petite navigation, la saillie du busc sur le radier peut être de 0m,20; mais si l'ouverture de l'écluse est plus considérable, comme les portes très-larges tendent à baisser du nez, pour éviter leur frottement sur le radier, on est obligé de les tenir un peu au-dessus du radier, et par suite d'augmenter la saillie du busc; ainsi, pour les écluses de 5m,20, 7 mètres et 8 mètres d'ouverture, cette saillie est de 0m,25, et pour les écluses de 8 mètres à 12 mètres et au-dessus, elle est de 0m,30. Les pierres formant les buscs doivent pénétrer de 0m,35 à 0m,40 dans le radier et s'étendre dans toute la largeur du busc, de manière que celui-ci ne soit formé que d'une hauteur de voussoir. Le busc forme mur de chute, et, afin que les eaux ne soient pas projetées contre les murs verticaux, on lui donne du côté d'aval une forme cylindrique verticale concave.

Les *chardonnets* sont destinés à résister à la poussée de l'arête verticale de chacune des portes de l'écluse. Cette arête verticale s'arrondit, ainsi que le refouillement du chardonnet contre lequel elle butte; mais, afin d'éviter le frottement de ces parties l'une contre l'autre dans la manœuvre de l'écluse, on ne place pas les tourillons de la porte dans l'axe du côté arrondi; leur position est telle, qu'il n'y a contact de ce côté contre le chardonnet que quand la porte est appliquée contre le busc, et que sitôt que la porte commence à s'ouvrir, ce contact cesse. Afin que les portes, quand elles sont ouvertes, ne fassent pas saillie sur les parements des murs, on met ceux-ci en retrait d'une quantité égale à l'épaisseur des portes, sur une longueur égale à la largeur de ces portes; c'est seulement en amont de ces retraites, appelées *enclaves*, que l'on fait les coulisses. Entre les enclaves et les coulisses, il faut laisser une épaisseur de pierre suffisante pour résister à la pression que produira un barrage établi dans les coulisses; cette séparation ne doit guère avoir moins de 0m,60. La distance de la coulisse au mur en retour qui raccorde le sas avec le bief est encore de 0m,60.

A l'exception des chaînes en pierres de taille placées aux points où se trouvent des angles, le parement du reste des murs bajoyers est construit en petits matériaux, si ce n'est cependant pour le mur de chute, où on fait usage de pierres de taille, afin que son parement résiste bien aux chocs des bateaux. Les pierres de taille formant le couronnement de tous les murs doivent avoir des dimensions suffisantes pour résister à la poussée des terres à l'époque des gelées; on leur donne ordinairement 0m,40 d'épaisseur sur 0m,75 de largeur.

Les parements des bajoyers doivent être exécutés en matériaux durs et non attaquables par la gelée. Ils doivent se relier parfaitement avec la maçonnerie de remplissage placée derrière; on atteint bien ce but en disposant de distance en distance une boutisse de $0^m,70$ à $0^m,80$ ou même 1 mètre de longueur de queue. D'après M. Mary, les parements doivent être en pierre non gélive sur une épaisseur de $0^m,60$ au moins.

Le radier se raccorde avec les fonds des biefs d'amont et d'aval par des plates-bandes en pierres de taille faisant voûte du côté du radier de manière à le défendre. Les voussoirs formant ces plates-bandes ont de $0^m,80$ à 1 mètre de longueur, selon que le sas a une largeur de $5^m,20$ à $6^m,50$ et même au delà.

Dans le sas, il convient de faire le radier légèrement concave, afin de le rendre plus propre à résister à la sous-pression de l'eau quand on vide le sas. Les parties de radier placées dans les chambres d'amont et d'aval, et celles extérieures à ces chambres, sont planes.

Ordinairement, pour plus de solidité, on exécute en pierre de taille la partie de radier située sous les murs de chute, ainsi que celles placées dans les chambres des portes.

659. *Portes d'écluses.* Elles sont à deux ventaux symétriques butant l'un contre l'autre, et s'appuyant contre les buscs et les chardonnets. On les fait en bois, avec quelques ferrures pour les consolider; en fonte, bois et fer forgé; en fonte, bois et tôle, ou encore en fonte et bois.

En France, les portes sont le plus habituellement en bois; ce sont les moins chères, sous le point de vue des dépenses d'exécution. Au barrage éclusé du petit bras de la Seine, à Paris, les parois des portes sont formées d'une série de demi-cylindres en tôle, rivés entre eux dans toute leur longueur, et placés horizontalement et de manière que leur convexité se trouve vers l'amont.

Chaque ventail en bois est formé de deux poteaux : l'un, dit *poteau tourillon* parce qu'il porte les pivots, s'applique contre le chardonnet; l'autre, appelé *poteau busqué* parce qu'il vient s'appuyer ou busquer, par une face inclinée au plan du ventail, contre le poteau de même nom de l'autre ventail. Ces deux poteaux sont reliés entre eux par des entretoises horizontales supportant la pression de l'eau, et dont le nombre dépend de la hauteur de la porte; c'est contre ces entretoises que l'on fixe les madriers jointifs formant le bordage de la porte.

On tient les poteaux à $0^m,05$ ou $0^m,06$ du radier, afin qu'ils ne l'atteignent pas dans leur mouvement, et on les élève à $0^m,20$ ou $0^m,25$ au-dessus de l'eau, quand la porte est manœuvrée par une crémaillère circulaire; quand la porte est manœuvrée à l'aide d'un grand levier qui réunit le haut des poteaux et fait en partie équilibre au poids de la porte, les poteaux s'élèvent à une certaine hauteur au-dessus des bajoyers.

L'entretoise supérieure se place à $0^m,10$ environ au-dessus du niveau des eaux navigables, et celle inférieure à $0^m,10$ au-dessus du radier. Quant aux entretoises intermédiaires, on les place de manière que la pression que chacune d'elles supporte soit proportionnée à ses dimensions.

Pour évaluer la pression que supporte chaque entretoise, il convient de remarquer que la pression aux divers points de la hauteur d'une porte noyée seulement sur une face est proportionnelle à la hauteur d'eau au-dessus de ces divers points; d'où il résulte que la pression totale sur la porte peut être représentée par la surface du triangle ABC, figure 34, planche III, ayant pour hauteur la profondeur de l'eau contre la porte, et pour base la même profondeur, qui est proportionnelle à la pression sur les points les plus bas de la porte: ainsi, H étant la profondeur d'eau, la pression totale sur chaque unité de largeur de porte est $H \times \frac{H}{2} = \frac{H^2}{2}$.

La pression moyenne qui s'exerce sur tous les points de la porte est $\frac{H}{2}$, et c'est à cette pression moyenne que doit pouvoir résister l'ensemble des entretoises. Il convient de remarquer qu'il ne suffit pas que l'ensemble des entretoises puisse résister à cette pression, mais qu'il faut aussi les espacer de manière que chacune d'elles supporte la même charge (cela suppose qu'elles ont les mêmes dimensions). On aura la position de chaque entretoise en divisant le triangle ABC en autant de parties équivalentes qu'il y a d'entretoises, par les droites *dc*, *fg*, *hi* parallèles à la base, et en plaçant les entretoises à la hauteur du centre de gravité des trapèzes et du triangle formés par ces parallèles (*Int.* 1092).

Appelant h_1, h_2, h_3,..... les distances des parallèles *dc*, *fg*, *hi*..... au-dessous du point A, et n le nombre des entretoises ou des divisions de AB, on a respectivement $h^2_1 = H^2\frac{n-2}{n-1}$, $h^2_2 = H^2\frac{n-3}{n-1}$, $h^2_3 = H^2\frac{n-4}{n-1}$, etc.

C'est à la hauteur des centres de gravité des trapèzes formés par les lignes CB, *dc*, *fg*..... qu'il faut placer les entretoises, et la surface de chacun de ces trapèzes représente la pression que supporte chacune des entretoises. Dans la pratique, comme on est obligé de placer une entretoise au-dessus et au-dessous de la porte, on est forcé de s'écarter un peu des positions déterminées par la théorie pour les entretoises. La marche précédente est également celle à suivre pour fixer les positions des cercles des grandes cuves.

Si les entretoises étaient également espacées, on pourrait, sans erreur sensible, déterminer leurs dimensions en supposant que la pression que supporte chacune d'elles est représentée par la demi-somme des sur-

faces des trapèzes inférieur et supérieur. (Cette demi-somme représente la pression sur chaque unité de longueur d'entretoise) (220).

Quant à la pression produite par l'eau, les entretoises inférieure et supérieure travaillent moins que les entretoises intermédiaires; cependant, comme elles forment le cadre de la porte et qu'elles sont entaillées pour recevoir les abouts des madriers formant le bordage, leurs dimensions sont supérieures à celles des autres.

Si la porte était noyée sur les deux faces au-dessous du point B, la pression sur la face d'aval détruirait l'augmentation de pression sur la face d'amont, et l'excès de pression sur chacun des éléments de porte inférieurs au point B serait constant et égal à BC ; d'où il résulterait que la pression totale de l'eau, pour rompre les entretoises, serait représentée par la surface du triangle ABC, plus la surface d'un rectangle ayant BC pour base, et pour hauteur la distance de l'arête inférieure de la porte au-dessous du point B (229).

Autrefois on reliait les entretoises entre elles et aux poteaux par une pièce inclinée, appelée *bracon*, s'étendant du haut du poteau busqué au bas du poteau tourillon. Ce bracon était formé de deux parties ; l'une placée du côté d'amont et noyée dans le bordage, et l'autre du côté d'aval et formée de plusieurs morceaux séparés à leurs extrémités par les entretoises. Chaque morceau était relié à la pièce d'amont par deux boulons et assemblé à embrèvement dans les entretoises ou les poteaux. Les madriers formant le bordage de la porte étaient disposés en décharge parallèlement au bracon, et cloués sur les entretoises et dans les feuillures faites pour recevoir leurs extrémités dans les poteaux et les entretoises inférieure et supérieure. On remplace maintenant le bracon par un tirant en fer allant du haut du poteau tourillon au bas du poteau busqué. Une moufle à coins, que porte ce tirant, permet de le raccourcir, de relever le poteau busqué et d'éviter les affaissements de la partie antérieure de la porte. Ce tirant permet de placer verticalement les madriers formant le bordage.

Les *ventelles*, ou petites vannes destinées à remplir et vider les sas, se placent, une sur chaque ventail, entre deux potelets destinés à former les joues de l'ouverture et s'étendant sur tout l'intervalle des deux entretoises inférieures. Ces potelets se fixent par des boulons aux coulisses placées sur le bordage pour recevoir la ventelle ; quand on assemble ces potelets aux entretoises, on ne doit entailler que légèrement ces dernières, et du côté d'amont, c'est-à-dire sur leur face en contact avec le bordage, afin de diminuer le moins possible leur résistance.

Les ventelles peuvent être en bois, ou en tôle, ou en fonte; celles en fonte, dressées sur leurs parties frottantes et glissant sur des coulisses en cuivre, sont faciles à manœuvrer et conservent bien l'eau. Chaque

ventelle est placée contre la face d'amont de la porte, ainsi que sa queue.

Afin que la pierre du busc n'éclate pas sous la pression de l'entretoise inférieure, il convient d'armer l'arête d'amont du busc d'un bon madrier en bois de chêne fixé dans les bajoyers et scellé dans le radier avec des boulons.

Afin que le sable ne s'interpose pas entre la crapaudine et le pivot inférieur, ce qui augmenterait le frottement et accélérerait l'usure, on fixe la crapaudine au poteau et le pivot sur le sol (156).

660. *Fondations.* Les parties essentielles d'une écluse, c'est-à-dire le radier, les buscs et les pieds des bajoyers, devant être construites avec le plus grand soin, on ne doit les exécuter qu'en mettant à sec l'emplacement qu'elles doivent occuper (880).

661. *Épaisseur du radier.* Un radier peut être considéré comme une solive encastrée à ses deux extrémités sous les bajoyers, et sollicitée uniformément sur toute sa longueur par la différence entre son propre poids qui la sollicite de haut en bas, et celui de la colonne d'eau qui tend à la soulever. Cela suppose le sas vide, et que les eaux des sources ou des biefs environnants transmettent sous toute la surface du radier une sous-pression due à la hauteur du niveau de l'eau dans ces sources ou biefs au-dessus de la surface inférieure du radier. Alors, de cette différence de poids et de la formule du nº 220, dans laquelle on prendra pour R la valeur qui convient au mortier, on déterminera l'épaisseur h du radier.

Lorsqu'on établit un batardeau sur une couche de béton coulé, il faut que cette couche de béton soit, comme pour le radier, suffisante pour résister à la sous pression de l'eau, et que de plus cette sous-pression ne soit pas suffisante pour soulever la couche de béton et les parois du batardeau. Ce soulèvement n'est pas à redouter pour les radiers, à cause du poids considérable des bajoyers.

SUPPLÉMENT.

662. *Nomenclature des anciennes mesures.*

1° ***Mesures de longueur.*** L'unité principale de longueur était la ***toise***, qui se subdivisait en 6 ***pieds***, le pied en 12 ***pouces***, le pouce en 12 ***lignes*** et la ligne en 12 ***points***.

On avait encore la *perche des eaux et forêts*, de 22 pieds de longueur, et la *perche de Paris*, de 18 pieds.

Pour mesurer les étoffes on se servait de l'***aune***, qui valait 3 pieds 7 pouces 10 lignes et 10 points, ou $1^m,1884$.

Les mesures itinéraires étaient la ***lieue*** et le ***mille***.

La ***lieue terrestre***, de 25 au degré, vaut 2280,32888 toises. Le méridien terrestre vaut $360 \times 25 = 9000$ lieues, ou 20522960 toises.

La ***lieue marine***, de 20 au degré, vaut 2850,4111... toises.

La ***lieue de poste*** vaut 2000 toises.

Le ***mille*** vaut 1000 toises.

2° ***Mesures de surface.*** Ce sont : la ***toise carrée***, le ***pied carré***, le ***pouce carré***, la ***ligne carrée*** et le ***point carré***; surfaces carrées qui ont respectivement une toise, un pied, un pouce, une ligne et un point de côté. La toise carrée vaut 36 pieds carrés; le pied carré, 144 pouces carrés; le pouce carré, 144 lignes, et la ligne 144 points.

L'aune carrée équivaut à un carré d'une aune de côté.

Les mesures agraires étaient :

1° ***La perche des eaux et forêts***, carré de 22 pieds de côté, ce qui fait 484 pieds carrés, ou $13^{tol.},44$ de surface;

2° ***L'arpent des eaux et forêts***, qui vaut 100 perches, c'est-à-dire 48400 pieds carrés, ou $1344^{tol.c.},44$;

3° La ***perche de Paris***, carré de 18 pieds de côté, ce qui fait 324 pieds carrés, ou 9 toises carrées de surface;

4° ***L'arpent de Paris***, qui vaut 100 perches, c'est-à-dire 32400 pieds carrés, ou 900 toises carrées.

3° ***Mesures du volume.*** Ce sont : la ***toise cube***, le ***pied cube***, le ***pouce cube***, etc. ; cubes qui ont respectivement une toise, un pied, un pouce, etc., de côté. La toise cube vaut 216 pieds cubes; le pied cube vaut 1728 pouces cubes; le pouce cube, 1728 lignes cubes.

Pour les matières sèches, on se servait du ***muid;*** le muid de Paris valait 12 ***setiers;*** un setier, 12 ***boisseaux***; un boisseau, 16 ***litrons***, ou 13,01 litres (un muid valait donc 144 boisseaux).

Le *muid d'avoine* valait 12 setiers de chacun 24 boisseaux, ce qui faisait 288 boisseaux;

Le *muid de sel*, 12 setiers de chacun 16 boisseaux, ou 192 boisseaux;

Le *muid de charbon*, 10 setiers de chacun 32 boisseaux, ou 320 boisseaux;

Le *muid de chaux*, 12 setiers de chacun 12 boisseaux, ou 144 boisseaux, comme pour le froment;

Le *muid de plâtre*, 6 setiers de chacun 12 boisseaux, ou 72 boisseaux, moitié de celui de grain ou de chaux.

La *voie de bois* vaut 2 mètres cubes; la voie de charbon de bois, 2 hectolitres mesurés comble; la voie de charbon de terre, 30 demi-hectolitres mesurés comble.

La *corde des eaux et forêts* vaut 3,8391 *stères* ou mètres cubes, et, par suite, le stère vaut 0,2605 corde.

Mesures de capacité pour les liquides. Le *muid de Paris* valait 2 *feuillettes;* la feuillette, 2 *quartauts;* le quartaut, 9 *setiers* ou *veltes;* le setier, 8 *pintes;* le muid valait 288 pintes, les liquides supposés sans lie.

La *pinte de Paris* valait 2 *chopines;* la chopine, 2 *demi-setiers;* le demi-setier, 2 *poissons;* le poisson, 2 *demi-poissons;* le demi-poisson, 2 *roquilles.*

4° *Division de la circonférence.* La circonférence se divisait en 360 parties égales appelées *degrés;* le degré, en 60 *minutes;* la minute, en 60 *secondes;* la seconde, en 60 *tierces*, etc.

5° *Mesures de poids.* Ce sont : le *quintal*, qui vaut 100 *livres;* la livre, qui vaut 2 *marcs;* le marc, 8 *onces;* l'once, 8 *gros;* le gros, 72 *grains.*

6° *Unités monétaires.* Ce sont : la *livre tournois*, qui vaut 20 *sous;* le sou, qui vaut 4 *liards*, et le liard, 3 *deniers.*

Les monnaies de cuivre ou de billon étaient les *liards;* les pièces de 2 liards, les pièces de 6 liards, les *sous* de 4 liards, et les *gros sous* de 8 liards.

Les monnaies d'argent étaient les pièces de 6 sous, de 12 sous, de 24 sous, de 15 sous, de 30 sous, le petit écu de 3 livres, et l'écu de 6 livres.

Les monnaies d'or étaient le *louis* de 24 livres et le *double-louis.*

Les pièces d'argent contenaient 11/12 de leur poids en argent pur et 1/12 de cuivre. Les pièces d'or contenaient 11/12 de leur poids en or pur, 1/24 en argent et 1/24 en cuivre.

7° *Mesures temporaires.* Les mesures temporaires étaient et sont encore le *siècle*, qui vaut 100 *ans;* l'année, qui vaut 12 *mois* ou 365 *jours;* à très-peu près tous les 4 ans, il y a une année qui est bissextile, c'est-à-dire qui contient 366 jours au lieu de 365; c'est afin de rétablir l'harmonie entre l'*année civile* et l'*année solaire*, durée d'une révolution entière de la terre autour du soleil; cette durée est de 365 jours, 5 heures, 48 minutes, 45 secondes (*Int.*, 200),

Le jour vaut 24 *heures;* l'heure, 60 *minutes*, et la minute 60 *secondes.*

Les noms et durées des mois sont : *janvier*, 31 jours; *février*, 28 jours, et 29 pour les années bissextiles; *mars*, 31; *avril*, 30; *mai*, 31; *juin*, 30; *juillet*, 31; *août*, 31; *septembre*, 30; *octobre*, 31; *novembre*, 30; *décembre*, 31.

663. *Nomenclature des nouvelles mesures* (Int., 203).

1° *Mesures de longueur.* L'unité principale est le *mètre*, qui est égal à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, c'est-à-dire à 0t,513074.

Le mètre vaut 10 *décimètres ;* le décimètre, 10 *centimètres ;* le centimètre, 10 *millimètres*, etc.

Pour évaluer les grandes longueurs, on se sert du *décamètre*, qui vaut 10 mètres; de l'*hectomètre*, qui vaut 10 décamètres ou 100 mètres; du *kilomètre*, de 10 hectomètres ou 1000 mètres, et du *myriamètre*, de 10 kilomètres ou 10 000 mètres.

2° *Mesures de surface.* Ce sont : le *mètre carré*, le *décimètre carré*, le *centimètre carré*, le *millimètre carré*. Le mètre carré vaut 100 décimètres carrés; le décimètre carré, 100 centimètres carrés, et le centimètre carré, 100 millimètres carrés.

Les *mesures agraires* sont : l'*hectare*, ou arpent métrique, l'*are* et le *centiare*. L'hectare vaut 100 ares; l'are, 100 centiares, et le centiare, 1 mètre carré.

3° *Mesures de volume.* Ce sont : le *mètre cube*, le *décimètre cube*, le *centimètre cube*, etc. Le mètre cube vaut 1000 décimètres cubes; le décimètre cube, 1000 centimètres cubes; le centimètre cube, 1000 millimètres cubes, etc.

Pour mesurer les liquides on emploie : le *décalitre*, le *litre* et le *décilitre*. Le décalitre vaut 10 litres; le litre vaut 1 décimètre cube, et le décilitre est le 1/10 du litre.

Pour les matières sèches on fait usage du *kilolitre*, de l'*hectolitre*, du *décalitre* et du *litre*. Le décalitre vaut 10 litres; l'hectolitre, 10 décalitres ou 100 litres, et le kilolitre, 10 hectolitres ou 1000 litres.

Les bois s'évaluent au *stère* et au *décistère*. Le stère vaut un mètre cube; le décistère est le 1/10 du stère.

Dans les chantiers de Paris, le bois de chauffage se mesure à la voie, qui vaut 2 stères (277).

4° *Division de la circonférence.* La circonférence se divise en 400 parties égales appelées *degrés ;* le degré vaut 100 *minutes ;* la minute, 100 *secondes ;* la seconde, 100 *tierces*, etc.

5° *Mesures de poids.* L'unité fondamentale est le *kilogramme*, qui est le poids d'un décimètre cube d'eau prise à la température de 4°, c'est la température correspondant à son maximum de densité; 100 kilogrammes forment le *quintal métrique;* 10 quintaux ou 1000 kilogrammes valent 1 *millier*, c'est le poids du *tonneau de mer ;* le kilogramme vaut 10 *hectogrammes ;* l'hectogramme, 10 *décagrammes ;* le décagramme, 10 *grammes ;* le gramme, 10 *décigrammes ;* le décigramme, 10 *centigrammes*, etc.

6° *Unités monétaires.* Les unités monétaires sont : le *franc;* la pièce d'argent de 1 franc pèse 5 grammes; le franc vaut 10 *décimes*, et le décime, 10 *centimes*.

Les nouvelles monnaies d'argent sont les pièces de 5 francs (40 pèsent 1 kilogramme), de 2 francs, de 1 franc, d'un demi-franc et d'un cinquième de franc.

Les nouvelles monnaies d'or sont les pièces de 5, 10, 20 et 40 francs; les pièces de 20 fr. pèsent 6g,45161, et les autres ont des poids proportionnels à leurs valeurs.

Les nouvelles monnaies d'argent et d'or contiennent 9/10 d'argent ou d'or pur et 1/10 d'alliage.

Les nouvelles monnaies de cuivre sont : le *centime*, le *sou* de 5 centimes, et le *gros sou*, de 10 centimes ou 1 décime.

664. TABLES DE RÉDUCTION DES ANCIENNES MESURES EN NOUVELLES, ET RÉCIPROQUEMENT.

1° *Toises, pieds et pouces en mètres, et lignes en millimètres.*

NOMBRES d'unités.	TOISES en metres.	PIEDS en metres.	POUCES en mètres.	LIGNES en millimètres.
	m.	m.	m.	millim.
1	1.94904	0.32484	0.02707	2.256
2	3.89807	0.64968	0.05414	4.512
3	5.84710	0.97452	0.08121	6.767
4	7.79615	1.29936	0.10828	9.023
5	9.74518	1.02420	0.13535	11.279
6	11.69422	1.94904	0.16242	18.535
7	13.64326	2.27388	0.18949	15.791
8	15.59229	2.59872	0.21650	18.047
9	17.54133	2.92355	0.24363	20.302
10	19.49037	3.24839	0.27070	22.558
11	21.43940	3.57323	0.29777	24.814
12	23.38844	3.89807	9.32484	27.070
13	25.33748	4.22291	0.35191	29.326
14	27.28651	4.54775	0.37898	31.582
15	29.23555	4.87259	0.40605	33.837
10	31.18459	5.19743	0.43312	30.093
17	33.13362	5.52227	0.46019	38.349
18	35.08266	5.84711	0.48726	40.605
19	37.03109	6.17194	0.51433	42.861
20	38.98073	6.49679	0.54140	45.117
21	40.92977	6.82163	0.56847	47.372
22	42.87879	7.14647	0.59554	49.628
23	44.82783	7.47131	0.62261	51.884
24	46.77687	7.79615	0.64968	54.140
25	48.72591	8.12099	0.07675	56.396
20	50.07495	8.44583	0.70382	58.652
27	52.62399	8.77066	0.73089	60.907
28	54.57302	9.09550	0.75796	63.163
29	56.52206	9.42034	0.78503	65.419
30	58.47110	9.74518	0.81210	67.675
31	60.42013	10.07002	0.83917	69.931
32	62.36917	10.39486	0.86624	72.187
33	64.31821	10.71970	0.89331	74.442
34	66.26724	11.04454	0.92038	76.098
35	68.21628	11.36938	0.94745	78.954
36	70.16532	11.69422	0.97452	81.210
37	72.11435	12.01905	1.00159	83.466
38	74.06339	12.34388	1.02866	85.722
39	76.01243	12.66873	1.05573	87.977
40	77.96146	12.99358	1.08280	90.233
41	79.91050	13.31842	1.10987	92.489
42	81.85954	13.64326	1.13694	94.745
43	83.80857	13.96810	1.16401	97.001
44	85.75758	14.29293	1.19108	99.257
45	87.70662	14.61777	1.21815	101.512
40	89.65567	14.94261	1.24522	103.768
47	91.60471	15.26745	1.27229	106.024
48	93.55375	15.59229	1.29936	108.280
49	95.50279	15.91713	1.32643	110.536
50	97.45183	16.24197	1.35350	112.792
100	194.90366	32.48394	2.70700	225.583
1000	1949.03659	324.83943	27.06995	2255.829
10000	19490.36591	3248.39432		

2° *Toises carrées et pieds carrés en mètres carrés.*

Toises cubes et pieds cubes en mètres cubes.

NOMBRES d'unités.	TOISES CARRÉES en metres carrés.	PIEDS CARRÉS en mètres carrés.	NOMBRES d'unités.	TOISES CUBES en metres cubes.	PIEDS CUBES en mètres cubes.
	m. carrés.	m. carrés.		m. cubes.	m. cubes.
1	3.7987	0.1655	1	7.4039	0.03428
2	2.5975	0.2110	2	14.8078	0.06855
3	11.3962	0.3166	3	22.2117	0.10283
4	15.1950	0.4221	4	29.6156	0.13711
5	18.9937	0.5276	5	37.0195	0.17139
6	22.7925	0.6331	6	44.4233	6.20566
7	26.5912	0.7386	7	51.8272	0.23994
8	36.3899	0.8442	8	59.2311	9.27422
9	34.1887	0.9797	9	66.6350	6.36850
16	37.9874	1.0552	16	74.6389	0.34277
11	41.7862	1.1007	11	81.4428	6.37705
12	45.5849	1.2663	12	88.8467	0.41133
13	49.3837	1.3718	13	96.2566	6.44566
14	53.1824	1.4773	14	103.6545	6.47988
15	56.9812	1.5828	15	111.6584	6.51416
16	60.7799	1.6883	16	118.4622	0.54844
17	64.5786	1.7938	17	125.8661	0.58271
18	68.3774	1.8994	18	133.2700	0.61699
19	72.1761	2.6049	19	140.6739	0.65127
20	75.9749	2.1104	26	148.0778	6.68555
21	79.7736	2.2159	21	155.4817	6.71983
22	83.5724	2.3214	22	162.8856	6.75410
23	87.3711	2.4270	23	170.2895	0.78838
24	91.1698	2.5325	24	177.6935	0.82266
25	94.9686	2.6380	25	185.0973	0.85694
26	98.7673	2.7435	26	192.6012	0.89121
27	102.5661	2.8496	27	199.9650	0.92549
28	106.3648	2.9546	28	207.3089	0.95977
29	110.1636	3.0661	29	214.7128	0.99404
30	113.9623	3.1656	30	222.1167	1.02832
31	117.7616	3.2712	31	229.5206	1.66260
32	121.5598	3.3767	32	236.9245	1.09688
33	125.3585	3.4822	33	244.3284	1.13115
34	129.1573	3.5877	34	251.7323	1.16543
35	132.9566	3.6932	35	259.1362	1.19971
36	136.7548	3.7987	36	266.5461	1.23398
37	140.5535	3.9042	37	273.9439	1.26826
38	144.3523	4.6098	38	281.3478	1.36254
39	148.1510	4.1153	39	288.7517	1.33681
46	151.9497	4.2208	40	296.1556	1.37109
41	155.7485	4.3263	41	303.5595	1.46537
42	159.5472	4.4319	42	310.9634	1.43965
43	163.3416	4.5374	43	318.3673	1.47394
44	167.1447	4.6429	44	325.7712	1.56820
45	179.9435	4.7484	45	333.1751	1.54248
46	174.7422	4.8539	46	340.5790	1.57675
47	178.5469	4.9595	47	347.9836	1.61103
48	182.3397	5.0650	48	355.3871	1.64531
49	186.1384	5.1705	49	362.7909	1.67959
56	189.9372	5.2760	50	376.1945	1.71387
100	379.8744	10.5522	106	740.3890	3.42773
1000	3798.7436	[illegible]	1000	7403.8903	

3° *Mètres en toises, pieds, pouces et lignes.*

NOMBRES de mètres.	MÈTRES en toises.	MÈTRES en toises, pieds, pouces, lignes.				MÈTRES en pieds, pouces, lignes		
	toises.	toises.	pi.	pouc.	lignes.	pieds.	pouc.	lignes.
1	0.5130 74	0	3	0	11.296	3	0	11.296
2	1.026148	1	0	1	10.592	6	1	10.593
3	1.539222	1	3	2	9.888	9	2	9.888
4	2.052296	2	0	3	9.184	12	3	9.184
5	2.565370	2	3	4	8.480	15	4	8.480
6	3.078444	3	0	5	7.776	18	5	7.776
7	3.591518	3	3	6	7.072	21	6	7.072
8	4.104592	4	0	7	6.368	24	7	6.368
9	4.617666	4	3	8	5.664	27	8	5.664
10	5.13074	5	0	9	4.960	30	9	4.960

4° *Décimètres en pieds, pouces et lignes; centimètres en pouces et lignes, et millimètres en lignes.*

NOMBRES d'unités.	DÉCIMÈTRES en pieds, pouces, lignes.			CENTIMÈTRES en pouces et lignes.		MILLIMÈTRES en lignes.
	pieds.	pouces.	lignes.	pouces.	lignes.	lignes.
1	0	3	8.330	0	4.433	0.443
2	0	7	4.659	0	8.866	0.887
3	0	11	0.989	1	1.299	1.330
4	1	2	9.318	1	5.732	1.773
5	1	6	5.648	1	10.165	2.216
6	1	10	1.977	2	2.598	2.660
7	2	1	10.307	2	7.031	3.103
8	2	5	6.637	2	11.464	3.546
9	2	9	2.966	3	3.897	3.990
10	3	0	11.296	3	8.330	4.433

5° *Mètres carrés et cubes en toises carrées et cubes.*

Mètres carrés et cubes en pieds carrés et cubes.

NOMBRES d'unités.	MÈTRES CARRÉS en toises carrées.	MÈTRES CUBES en toises cubes.	NOMBRES d'unités.	MÈTRES CARRÉS en pieds carrés.	MÈTRES CUBES en pieds cubes.
	toises carrées.	toises cubes.		pieds carrés.	pieds cubes.
1	0.2632	0.1351	1	9.48	29.17
2	0.5265	0.2701	2	18.95	58.35
3	0.7897	0.4052	3	28.43	87.52
4	1.0530	0.5403	4	37.91	116.70
5	1.3162	0.6753	5	47.38	145.87
6	1.5795	0.8104	6	56.86	175.04
7	1.8427	0.9454	7	66.34	204.22
8	2.1060	1.0805	8	75.81	233.39
9	2.3692	1.2156	9	85.29	262.56
10	2.6324	1.3506	10	94.77	291.74

6° *Dans la construction des tables qui précèdent, on a adopté les valeurs suivantes :*

Toise.	1,949 036 5912 mètre.
Toise carrée.	3,798 743 6338 mètres carrés.
Toise cube.	7,403 890 3430 mètres cubes.
Mètre.	0,513 074 de toise.
Mètre carré.	0,263 244 929 476 de toise carrée.
Mètre cube.	0,135 064 128 946 de toise cube.

7° *Mesures itinéraires.*

La lieue de 25 au degré.	vaut . . . . 4.444 kilomètres.
La lieue marine, de 20 au degré.	— . . . . 5,556 —
La lieue de poste, de 2000 toises.	— . . . . 3,898 —
Le mille, de 1000 toises.	— . . . . 1,949 —
1 kilomètre vaut.	0,22499 lieue de 25 au degré.
—	0,17778 — 20 —
—	0,26651 — 2000 toises.
—	0,53302 mille.

8° *Mesures agraires.*

.	PIEDS CARRÉS.	TOISES CARRÉES.	MÈTRES CARRÉS.
Perche des eaux et forêts. . . .	484	13.44	51.07
Arpent des eaux et forêts. . . .	48400	1344.44	5107.20
Perche de Paris.	324	9	34.19
Arpent de Paris.	32400	900	3418.87
Are.	947.7	26.32	100
Hectare.	94768.2	2632.45	10000

9° *Arpents en hectares.* *Hectares en arpents.*

NOMBRES d'arpents.	ARPENTS de 100 perches de 22 pieds de côté.	ARPENTS de 100 perches de 18 pieds de côté.	NOMBRES d'hectares.	ARPENTS de 100 perches de 22 pieds.	ARPENTS de 100 perches de 18 pieds.
	hectares.	hectares.		arpents.	arpents.
1	0.5107	0.3419	1	1.0580	2.9249
2	1.0214	0.6838	2	3.9160	5.8499
3	1.5322	1.0257	3	5.8741	8.7748
4	2.0429	1.3675	4	7.8321	11.6998
5	2.5536	1.7094	5	9.7901	14.6247
6	3.0643	2.0513	6	11.7481	17.5497
7	3.5750	2.3932	7	13.7061	20.4746
8	4.0858	2.7351	8	15.6642	23.3995
9	4.5965	3.0770	9	17.6222	26.3245
10	5.1072	3.4189	10	19.5802	29.2494
100	51.0720	34.1887	100	195.8020	292.4944
1000	510.7198	341.8869	1000	1958.0201	2924.9437

10° *Réduction des setiers de 12 boisseaux de 13l,01 en hectolitres.* — *Réduction des hectolitres en setiers.*

SETIERS.	HECTOLITRES.	HECTOLITRES.	SETIERS.
1	1.56	1	0.641
2	3.12	2	1.282
3	4.68	3	1.923
4	6.24	4	2.564
5	7.80	5	3.205
6	9.36	6	3.846
7	10.02	7	4.487
8	12.48	8	5.128
9	14.04	9	5.760
10	15.60	10	6.410
50	78.00	50	32.051
100	156.00	100	64.102

11° *Réduction des muids de grain, de sel, d'avoine et de charbon en hectolitres.*

NOMBRES de muids.	GRAIN. — Muid de 144 boisseaux.	SEL. — Muid de 192 boisseaux.	AVOINE. — Muid de 288 boisseaux	CHARBON. — Muid de 320 boisseaux.
	hect.	hect.	hect.	hect.
1	18.73	24.08	37.46	41.60
2	37.46	49.05	74.93	83.30
3	56.20	74.03	112.30	124.90
4	74.93	99.90	149.86	166.50
5	93.66	124.88	187.32	208.10
6	112.30	149.86	224.78	249.80
7	131.12	174.83	262.25	201.40
8	140.86	199.81	299.71	333.00
9	108.50	224.78	337.18	374.60
10	187.30	240.80	374.60	416.00

12° *Réduction des pintes en litres.* — *Réduction des veltes en litres.* — *Réduction des litres en pintes.*

PINTES.	LITRES.	VELTES.	LITRES.	LITRES.	PINTES.
1	0.952	1	7.62	1	1.05042
2	1.904	2	15.23	2	2.10
3	2.856	3	22.85	3	3.15
4	3.808	4	30.46	4	4.20
5	4.760	5	38.08	5	5.25
6	5.712	6	45.70	6	6.30
7	6.664	7	53.31	7	7.35
		8	00.93	8	8.40
		0	68.54	9	0.45
		10	76.16	10	10.50

13° *Conversion des anciens poids en nouveaux.*

GRAINS	GRAMMES.	ONCES.	GRAMMES.	LIVRES.	KILOGRAMMES.
10	0.53	1	30.59	1	0.4895
20	1.06	2	61.19	2	0.9790
30	1.59	3	91.78	3	1.4685
40	2.12	4	122.38	4	1.9580
50	2.66	5	152.97	5	2.4475
60	3.19	6	183.56	6	2.9370
70	3.72	7	214.16	7	3.4265
GROS.		8	244.75	8	3.9160
1	3.82	9	275.35	9	4.4056
2	7.65	10	305.94	10	4.8951
3	11.47	11	336.53	50	24.4753
4	15.30	12	367.14	100	48.9506
5	19.12	13	397.73	500	244.7529
6	22.94	14	428.33	1000	489.5058
7	26.77	15	458.91		

14° *Conversion des nouveaux poids en anciens.*

GRAMMES.	ONCES.	GROS.	GRAINS.	GRAMMES.	LIVRES.	ONCES.	GROS.	GRAINS.
0.05	0	0	0.94136	300	0	9	6	32
0.10	0	0	1.88	400	0	13	0	43
0.15	0	0	2.82	500	1	0	2	53
0.20	0	0	3.77	600	1	3	4	64
0 25	0	0	4.71	700	1	6	7	3
0.50	0	0	9.41	800	1	10	1	13
0.75	0	0	14.12	900	1	13	3	24
1	0	0	18.83	kil. 1	2	0	5	35.15
2	0	0	37.65	2	4	1	2	70
3	0	0	56.48	3	6	2	0	33
4	0	1	3.30	4	8	2	5	69
5	0	1	22.14	5	10	3	3	32
6	0	1	41	6	12	4	0	67
7	0	1	60	7	14	4	6	30
8	0	2	7	8	16	5	3	65
9	0	2	25	9	18	6	1	28
10	0	2	44	10	20	6	6	64
20	0	5	17	20	40	13	5	55
30	0	7	61	30	61	4	4	47
40	1	2	33	40	81	11	3	38
50	1	5	5	50	102	2	2	30
60	1	7	50	60	122	9	1	21
70	2	2	22	70	143	0	0	13
80	2	4	66	80	163	6	7	4
90	2	7	38	00	183	13	5	68
100	3	2	11	100	204	4	4	50
200	6	4	21					

Le kilogramme, ou le poids d'un décimètre cube d'eau distillée considérée au maximum de densité vaut. . . . . 18827,15 grains.
La livre vaut. . . . . 9216 grains.
Donc la livre vaut. . . . . 0.489505847 kilogr.
Et le kilogramme. . . . . 2.042876519 livres.

14° *Conversion des nouveaux poids en anciens.*

KILOGRAM.	LIVRES.	GRAMMES.	GRAINS.	DÉCIGRAM.	GRAINS.
1	2.0420	1	18.827	1	1.9
2	4.0858	2	37.6	2	3.8
3	6.1286	3	56.5	3	5.6
4	8.1715	4	75.3	4	7.5
5	10.2144	5	94.1	5	9.4
6	12.2573	6	113.0	6	11.3
7	14.3001	7	131.8	7	13.2
8	16.3430	8	150.6	8	15.1
9	18.3859	9	169.4	9	16.9
10	20.4288	10	188.27	10	18.8

665. TABLE DE COMPARAISON DES MESURES ANGLAISES AUX MESURES FRANÇAISES.

Mesures de longueur.

Anglaises.	Françaises.	
Pouce (1/36 du yard).	2.530954	centimètres.
Pied (1/3 du yard).	3.0479449	décimètres.
Yard impérial.	0.91438348	mètre.
Fathom (2 yards).	1.82876696	mètre.
Pole ou perch (5 1/3 yards).	5.02911	mètres.
Furlong (220 yards)	201.16437	mètres.
Mille (1760 yards).	1609.3149	mètres.

Françaises.	Anglaises.	
Millimètre.	0.03937	pouce.
Centimètre.	0.393708	pouce.
Décimètre.	3.937079	pouces.
Mètre.	39.37079	pouces.
	3.2808992	pieds.
	1.093633	yards.
Myriamètre.	6.2138	milles.

Mesures de superficie.

Anglaises.	Françaises.	
Yard carré.	0.836097	mètre carré.
Rod (perche carrée).	25.291939	mètres carrés.
Rood (1210 yards carrés).	10.116775	ares.
Acre (4840 yards carrés).	0.404671	hectare.

Françaises.	Anglaises.	
Mètre carré.	1.196033	yard carré.
Are.	0.098845	rood.
Hectare.	2.471143	acres.

Mesures de capacité.

Anglaises.	Françaises.	
Pint (1/8 de gallon)	0.567932	litre.
Quart (1/4 de gallon)	1.135864	litre.
Gallon impérial	4.54345797	litres.
Peck (2 gallons)	9.0869159	litres.
Bushel (8 gallons)	36.347664	litres.
Sack (3 bushels)	1.09043	hectolitre.
Quarter (8 bushels)	2.907813	hectolitres.
Chaldron (12 sacks)	13.08516	hectolitres.

Françaises.	Anglaises.	
Litre	1.760773	pint.
	0.2200967	gallon.
Décalitre	2.2009668	gallons.
Hectolitre	22.009668	gallons.

Poids.

Anglais (Troy).	Français.	
Grain (1/24 de pennyweight)	0.065	gramme.
Pennyweight (1/20 d'once)	1.555	gramme.
Once (1/12 de livre troy)	31.091	grammes.
Livre troy impériale	0.373096	kilogramme.

Anglais (avoirdupois).	Français.	
Dramm (1/16 d'once)	1.771	gramme.
Once (1/16 de la livre)	28.338	grammes.
Livre avoirdupois impériale	0.4534	kilogrammes.
Quintal (112 livres)	50.78	kilogrammes.
Tonne (20 quintaux)	1015.65	kilogrammes.

Français.	Anglais.	
Gramme	15.438	grains troy.
	0.643	pennyweight.
	0.0322	once troy.
Kilogramme	2.6803	livres troy.
	2.2055	livres avoirdupois.

666. *Conversion des mesures anglaises en mesures françaises.*

NOMB. d'unités.	POUCES en centimètres	PIEDS en mètres.	MILLES en kilomètres.	PIEDS carrés en mètres carrés.	PIEDS CUBES en mètres cubes.	LIVRES par pouce carré en kilog. par centimètre carré.
1	2.5400	0.3047945	1.6093	0.09290	0.028314	0.0702774
2	5.0799	0.6095890	3.2186	0.18580	0.056628	0.1405548
3	7.6199	0.9143835	4.8279	0.27870	0.084942	0.2108322
4	10.1508	1.2197680	0.4373	0.37160	0.113256	0.2811096
5	12.6998	1.5239724	8.0466	0.46450	0.141570	0.3513870
6	15.2397	1.8287669	9.6559	0.55740	0.169884	0.4216644
7	17.7797	2.1335614	11.2652	0.05030	0.198198	0.4919418
8	20.3196	2.4383559	12.8745	0.74320	0.220512	0.5022192
9	22.8596	2.7431504	14.4838	0.83610	0.254826	0.6324966
10	25.4000	3.0479450	16.0930	0.92900	0.283140	0.7027740

NOMBRES d'unités.	LIVRES en kilogrammes.	TONNES en tonneaux de 1000 kil.	LIVRES STERL. en francs.	SHILLING en francs.	PENCES ou deniers en centimes.
1	0.4534148	1.015649	25.2080	1.2604	10.5033
2	0.9068296	2.031298	50.4160	2.5208	21.0066
3	1.3602444	3.046947	75.6240	3.7812	31.5099
4	1.8136592	4.062596	100.8320	5.0416	42.0132
5	2.2670740	5.078245	126.0400	6.3020	52.5165
6	2.7204888	6.093894	151.2480	7.5624	63.0198
7	3.1739030	7.109543	176.4560	8.8228	73.5231
8	3.6273184	8.125192	201.6640	10.0832	84.0264
9	4.0807332	9.140841	226.8720	11.3436	94.5297
10	4.5341480	10.156490	252.0800	12.6040	105.0330

Le *mille* vaut 5280 pieds anglais, il en faut 2 et 1/2 pour faire une lieue.

La *livre sterling* vaut à peu près 25 francs.

Le *shilling* (1/20 de la livre sterling) vaut environ 1 fr. 25 cent.

Le *penny* ou denier, monnaie de cuivre (1/12 de shilling), diffère très-peu du décime.

Le shilling et le penny ont une valeur intrinsèque un peu moindre que leur valeur nominale portée au tableau.

667. *Mesures russes.*

1° De longueur : la *sagène* vaut 7 *pieds* ou 2^m,1336 ; le pied, 12 *pouces* ou 0^m,3048 ; le pouce, 10 *lignes* ou 0^m,0254, et la ligne 0^m,00254.

Dans les constructions on emploie l'*archine*, qui est le tiers de la sagène, et qui vaut 16 *verchkoff* ou 0^m,7115 ; le verchkoff vaut 0^m,0444.

La mesure itinéraire est la *verste*, qui vaut 1067 mètres.

2° De capacité pour les liquides : le *tonneau* vaut 40 *vedro* ou 471l,56 ; le vedro, 10 *kruska* ou 8 *chtoffs* ou 12l,289 ; le kruska, 10 *tcharki* ou 1l,229.

Pour les matières sèches on emploie le *tchetvert*, qui vaut 8 *tchetverick* ou 209l,740 ; le tchetverick vaut 8 *garnetz*, et le garnetz, 3l,277.

3° De poids : le *berkobetz* vaut 10 *poud* ou 163k,72 ; le poud, 40 *livres* ou 16k,372 ; la livre, 96 *zolotnick* ou 0k,409388 ; le *zolotnick*, 96 *doleis*, et le doleis 0k,00005.

668. *Évaluations, en mesures françaises, des principales mesures linéaires étrangères, à l'usage du commerce.*

		millim.
Amsterdam	*aune*	690.3
Anvers	*aune de soie*	694.8
	aune de laine	684.4
Berlin	*aune* (ancienne mesure)	667.7
	aune (nouvelle mesure)	666.9
Berne	*aune*	542.5
Bologne	*brasse*	645.2
Brunswick	*aune*	570.7
Brême	*aune*	578.4
Cagliari	*raso*	549.3
Carrare	*canne pour les bois*	624.6
	brasse marchande	619.7
	palme pour les marbres	249.3
Cassel	*aune*	569.4
Cologne	*aune*	575.2
Constantinople	*grande mesure*	669.1
	petite mesure	647.9
Copenhague	*aune danoise*	627.7
Cracovie	*aune*	617.0
Crémone	*brasse* (d'après les tavole di Ragguaglio)	594.9
Dresde	*aune*	566.5
Ferrare	*brasse pour la soie* (tables italiennes)	634.4
	brasse pour le coton et le linge (tab. it.)	673.6
Florence	*brasse*	594.2
Francfort-sur-Mein	*aune*	547.8
Gênes	*palme* (commission génoise)	248.3
Genève	*aune*	1143.7
Hambourg	*aune de Hambourg*	573.0
	aune de Brabant	691.5
Hanovre	*aune*	584.0
Harlem	*aune ordinaire*	683.5
	aune pour le linge	742.6
Leyde	*aune*	683.1

		millim
Leipsick	*aune*	565.3
Lisbonne	*vare*	1092.9
Lubeck	*aune*	577.0
Lucques	*brasse*	595.1
Madrid	*vare* (aune de Castille)	848.0
Mantoue	*brasse*	643.8
Milan	*brasse*	594.9
Modène	*brasse*	648.1
Munich	*aune*	833.0
Naples	*canne* (8 palmes napolitaines)	2096.1
Neufchâtel	*aune*	1111.1
Nurenberg	*aune*	656.4
Ostende	*aune*	699.3
Padoue	*brasse pour le drap*	681.0
	brasse pour la soie	637.5
Palerme	*canne* divisée en 8 palmes	1942.3
Parme	*brasse pour la laine, le coton et le linge*	643.8
	brasse pour la soie	594.4
Pavie	*brasse*	594.9
Pétersbourg	*archine*	711.5
Raguse	*aune*	513.2
Riga	*aune*	548.2
Rome	*canne des marchands* divis. en 8 palmes	1992.0
	brasse des marchands divis. en 4 palmes	848.2
	brasse des tisserands divisée en 3 palmes	636.1
Rostock	*aune*	575.2
Stockholm	*aune de Suède*	593.7
Stuttgard	*aune de Wurtemberg*	614.3
Turin	*raso* divisé en 14 onces (vassali candi)	599.4
Varsovie	*aune*	584.6
Vérone	*grande brasse*	649.0
	petite brasse	642.4
Weimar	*aune*	564.0
Venise	*brasse de laine*	683.4
	brasse de soie	638.7
Vicence	*brasse de drap*	690.3
	brasse de soie	637.5
Vienne	*aune de Vienne*	779.2
	aune de la Haute-Autriche	799.7
Zurich	*aune*	600.1

669. ***Réduction des principales mesures linéaires étrangères en mesures métriques.***

		millim.
Amsterdam	*pied.*	283.056
Anvers	*pied.*	285.588
Berlin	*pied du Rhin* (rendu légal dans toute la Prusse).	313,854
Berne	*pied.*	293.258
Brunswick	*pied.*	285,362
Brême	*pied.*	289.197
Cagliari	*palme, mesure du pays.*	248.367
	palme, mesure de la ville.	202.573
Calemberg	*pied.*	293.032
Carlsruhe	*pied nouveau.*	300.000
Cassel	*pied de construction.*	284.911
Chine	*pied.*	306.288
Cologne sur le Rhin (Prusse).		313.854
Constantinople	*grand pick.*	669.079
	petit pick ou draa stambulin.	647.874
Copenhague	*pied.*	313.621
Cracovie	*pied.*	356.421
Darmstadt	*pied de construction.*	300,000
Dresde	*pied.*	283.260
Durlach	*pied.*	291.002
Égypte	*coudée antique.*	525.924
Espagne	*pied de Madrid*, d'après Lohman.	282.655
	vare de Castille, d'après Ciscar.	835.906
	vare de la Havane, 3 pieds de Madrid.	847.965
Gotha	*pied.*	287.618
Hambourg	*pied.*	286.490
Hanovre	*pied.*	291.995
Lisbonne	*palme.*	218.590
	pied de construction.	338.600
Lubeck	*pied.*	291.002
Middelbourg	*pied.*	300,025
Munich	*pied.*	291,859
Neufchâtel	*pied.*	300,025
Nurenberg	*pied.*	303.793
Oldembourg	*pied.*	296.416
Pétersbourg	*pied russe.*	538.151
	archine.	711.480
Rostock	*pied.*	291.002
Stockholm	*pied.*	296.838
Stuttgard	*pied.*	286.490

		millim.
Varsovie.	*pied.*	297.769
Weimar.	*pied.*	281.972
Vienne.	*pied.*	316.103
Wisbaden.	*pied.*	287.844
Zante et Céphalonie.	*pied.*	347.398
Zurich.	*pied.*	301.879

670. *Table des circonférences et des surfaces des cercles ayant pour diamètres les nombre de la première colonne, et des carrés, cubes, racines carrées et racines cubiques d ces nombres.*

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.	Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
1	3.14	0.78	1	1	1.000	1.000	61	191.63	2922.46	3721	226981	7.810	3.936
2	6.28	3.14	4	8	1.414	1.259	62	194.77	3019.07	3844	238328	7.874	3.957
3	9.42	7.07	9	27	1.732	1.442	63	197.92	3117.24	3969	250047	7.937	3.979
4	12.57	12.57	16	64	2.000	1.587	64	201.06	3216.99	4096	262144	8.000	4.000
5	15.71	19.63	25	125	2.236	1.709	65	204.20	3318.30	4225	274625	8.062	4.020
6	18.85	28.27	36	216	2.449	1.817	66	207.34	3421.18	4356	287496	8.124	4.041
7	21.99	38.48	49	343	2.645	1.912	67	210.48	3525.65	4489	300763	8.185	4.061
8	25.13	50.26	64	512	2.828	2.000	68	213.62	3631.68	4624	314432	8.246	4.081
9	28.27	63.61	81	729	3.000	2.080	69	216.77	3739.28	4761	328509	8.306	4.101
10	31.41	78.54	100	1000	3.162	2.154	70	219.91	3848.45	4900	343000	8 366	4.121
11	34.55	95.03	121	1331	3.316	2.223	71	223.05	3959.19	5041	357911	8.426	4.140
12	37.69	113.09	144	1728	3.464	2.289	72	226.19	4071.50	5184	373248	8.485	4.160
13	40.84	132.73	169	2197	3.605	2.351	73	229.33	4185.38	5329	389017	8.544	4.179
14	43.98	153.93	196	2744	3.741	2.410	74	232.47	4300.84	5476	405224	8.602	4.198
15	47.12	176.71	225	3375	3.872	2.466	75	235.61	4417.86	5625	421875	8.660	4.217
16	50.26	201.06	256	4096	4.000	2.519	76	238.76	4536.45	5776	438976	8.717	4.235
17	53.40	226.98	289	4913	4.123	2.571	77	241.90	4656.62	5929	456533	8.774	4.254
18	56.54	254.46	324	5832	4.242	2.620	78	245.04	4778.36	6084	474552	8.831	4.272
19	59.69	283.52	361	6859	4.358	2.668	79	248 18	4901.66	6241	493039	8.888	4.290
20	62.83	314.15	400	8000	4.472	2.714	80	251.32	5026.54	6400	512000	8 944	4.308
21	65.97	346.36	441	9261	4.582	2.758	81	254.46	5153.00	6561	531441	9.000	4.326
22	69.11	380.13	484	10648	4.690	2.802	82	257.61	5281.01	6724	551368	9.055	4.344
23	72.25	415.47	529	12167	4.795	2.843	83	260.75	5410.59	6889	571787	9.110	4.362
24	75.39	452.38	576	13824	4.898	2.884	84	263.89	5541.77	7056	592704	9.165	4.379
25	78.54	490.87	625	15625	5.000	2.924	85	267.03	5674.50	7225	614125	9.219	4.396
26	81.68	530.93	676	17576	5.099	2.962	86	270.17	5808.80	7396	636056	9.273	4.414
27	84.82	572.55	729	19683	5.196	3.000	87	273.31	5944.67	7569	638303	9.327	4.431
28	87.96	615.75	784	21952	5.291	3.036	88	276.46	6082.11	7744	681472	9.380	4.447
29	91.10	660.52	841	24389	5.385	3.072	89	279.60	6221.13	7921	704969	9.433	4.464
30	94.24	706.85	900	27000	5.477	3.107	90	282.74	6361.72	8100	729000	9.486	4.481
31	97.38	754.76	961	29791	5.567	3.141	91	285.88	6503.87	8261	753571	9.539	4.497
32	100.53	804.24	1024	32768	5.656	3.174	92	289.02	6647.61	8464	778688	9.591	4.514
33	103.67	855.29	1089	35937	5.744	3.207	93	292.16	6792.90	8649	804357	9.643	4.530
34	106.81	907.92	1156	39304	5.830	3.239	94	295.31	6939.78	8936	830384	9.695	4.546
35	109.95	962.11	1225	42875	5.916	3.271	95	298.45	7088.21	9025	857375	9.746	4.562
36	113.09	1017.87	1296	46656	6.000	3.301	96	301.59	7238.23	9216	884736	9.797	4.578
37	116.23	1075.21	1369	50653	6.082	3.332	97	304.73	7389.81	9409	912673	9.848	4.594
38	119.38	1134.11	1444	54872	6.164	3.361	98	307.87	7542.96	9604	941192	9.899	4.610
39	122.52	1194.59	1521	59319	6.244	3.391	99	311.01	7697.68	9801	970299	9.949	4.626
40	125.66	1256.63	1600	64000	6.324	3.419	100	314.15	7853.97	10000	1000000	10.000	4.641
41	128.80	1320.25	1681	68921	6.403	3.448	101	317.30	8011.86	10201	1030301	10.049	4.657
42	131.94	1385.44	1764	74088	6.480	3.476	102	320.44	8171.30	10404	1061208	10.099	4.672
43	135.08	1452.20	1949	79507	6.557	3.503	103	323.58	8332.30	10609	1092727	10.148	4.687
44	138.23	1520 52	1936	85184	6.633	3.530	104	326.72	8494.88	10818	1124864	10.198	4.702
45	141.37	1590.43	2025	91125	6.708	3.556	105	329.86	8659.03	11025	1137625	10.246	4.717
46	144.51	1661.90	2116	97336	6.782	3.583	106	333.00	8824.75	11236	1191016	10.295	4.732
47	147.65	1734.94	2209	103823	6.855	3.608	107	336.15	8992.04	11449	1225043	10.344	4.747
48	150.79	1809.55	2304	110592	6.928	3.634	108	339.29	9160.90	11664	1259712	10.392	4.762
49	153.93	1885.74	2401	117649	7.000	3.659	109	342.43	9331.33	11881	1295029	10.440	4.776
50	157.08	1963.49	2500	125000	7.071	3.684	110	345.57	9505.34	12100	1331000	10.488	4.791
51	160.22	2042.82	2601	132651	7.141	3.708	111	348.71	9676.91	12321	1367831	10.535	4.805
52	163.36	2123.71	2704	140608	7.211	3.732	112	351.85	9852.05	12344	1404928	10.583	4.820
53	166.50	2206.18	2809	148877	7.280	3.756	113	355.01	10028.77	12769	1442897	10.630	4.834
54	169.64	2290.21	2916	157464	7.348	3.779	114	358.14	10207.05	12996	1481544	10.677	4.848
55	172.78	2375.82	3025	166375	7.416	3.802	115	361.28	10386.91	13225	1520873	10.723	4.862
56	175.92	2463.01	3136	175616	7.483	3.825	116	364.42	10568.34	13456	1560806	10.770	4.876
57	179.07	2551.75	3249	185193	7.549	3.848	117	367.56	10751.34	13689	1601613	10.816	4.890
58	182.21	2642.08	3364	195112	7.615	3.870	118	370.70	10935.90	13924	1643032	10.862	4.904
59	185.35	2733.97	3481	205379	7.681	3.892	119	373.85	11122.04	14161	1693159	10.908	4.918
60	188.49	2827.43	3600	216000	7.745	3.914	120	376.99	11309.76	14400	1728000	10.954	4.932

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
121	380.13	11499	14641	1771561	11.000	4.946
122	383.27	11689	14884	1815848	11.045	4.959
123	386.41	11882	15129	1860867	11.090	4.973
124	389.55	12076	15376	1906624	11.135	4.986
125	392.70	12271	15625	1953125	11.180	5.000
126	395.84	12469	15876	2000376	11.224	5.013
127	398.98	12667	16129	2048383	11.269	5.026
128	402.12	12867	16384	2097152	11.313	6.039
129	405.26	13069	16641	2146689	11.357	5.032
130	408.41	13273	16900	2197000	11.401	5.065
131	411.54	13478	17161	2248091	11.445	5.078
132	414.69	13684	17424	2299968	11.489	6.091
133	417.83	13892	17689	2352637	11.532	5.104
134	420.97	14102	17956	2406104	11.575	5.117
135	424.11	14313	18225	2460375	11.618	6.129
136	427.25	14526	18496	2515456	11.661	5.142
137	430.39	14741	18769	2371353	11.704	5.135
138	433.54	14957	19044	2628072	11.747	5.167
139	436.68	15174	19321	2685619	11.789	5.180
140	439.82	15393	19600	2744000	11.832	5.102
141	442.96	15614	19881	2803221	11.874	5.204
142	446.10	15836	20164	2865288	11.916	5.217
143	449.24	16060	20449	2924207	11.958	5.229
144	452.39	16286	20736	2985984	12.000	5.241
145	455.53	16513	21025	3048625	12.041	5.253
146	458.67	16741	21316	3112136	12.083	5.265
147	461.81	16971	21609	3176523	12.124	5.277
148	464.95	17203	21904	3241792	12.165	5.289
149	468.09	17436	22201	3307949	12.206	5.301
150	471.24	17671	22500	3375000	12.247	5.313
151	474.38	17907	22801	3442951	12.288	5.325
152	477.52	18145	23104	3511808	12.328	5.336
153	480.66	18385	23409	3581577	12.369	5.348
154	483.80	18626	23716	3652264	12.409	5.360
155	486.94	18869	24025	3723875	12.449	5.371
156	490.08	19113	24336	3796416	12.489	6.383
157	493.23	19359	24649	3869893	12.529	5.394
158	496.37	19606	24964	3944312	12.569	5.406
159	499.51	19855	25281	4019679	12.609	5.417
160	502.66	20106	25600	4096000	12.649	5.428
161	505.79	20358	25921	4173281	12.688	5.440
162	508.93	20612	26244	4251528	12.727	5.451
163	512.08	20867	26569	4330747	12.767	5.462
164	515.22	21124	26896	4410944	12.806	5.473
165	518.36	21382	27225	4492125	12.845	5.484
166	521.50	21642	27556	4574296	12.884	5.495
167	524.64	21904	27889	4657463	12.922	5.506
168	527.78	22167	28224	4741632	12.961	5.517
169	530.93	22431	28561	4826809	13.000	6.528
170	534.07	22698	28900	4913000	13.038	5.539
171	537.31	22965	29241	5000211	13.076	5.550
172	540.35	23233	29584	5088448	13.114	5.561
173	543.49	23506	29929	5177717	13.152	5.572
174	546.64	23778	30276	5268024	13.190	5.582
175	549.78	24052	30625	5359375	13.228	5.593
176	552.92	24328	30976	5451776	13.266	5.604
177	556.06	24605	31329	5545233	13.304	5.614
178	559.20	24884	31684	5639752	13.341	5.625
179	562.34	25165	32041	5735339	13.379	5.635
180	565.48	25446	32400	5832000	13.416	5.646
181	568.62	25730	32761	5929741	13.463	5.656
182	571.77	26013	33124	6028568	13.490	5.667
183	574.91	26302	33489	6128487	13.527	5.677
184	578.05	26590	33856	6229504	13.564	5.687
185	581.19	26880	34225	6331225	13.601	5.698

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
186	584.33	27171	34596	6434856	13.638	5.708
187	587.47	27464	34969	6539203	13.674	5.718
188	590.62	27759	35344	6644672	13.711	5.728
189	593.76	28055	35721	6751269	13.747	5.738
190	596.90	28352	36100	6859000	13.784	5.748
191	600.04	28652	36481	6967871	13.820	5.756
192	603.18	28952	36864	7077888	13.856	5.768
193	606.32	29255	37249	7189057	13.892	5.778
194	609.47	29559	67636	7301384	13.928	5.788
195	612.61	29864	38025	7414875	13.964	5.796
196	615.75	30171	38416	7529536	14.000	6.808
197	618.89	30480	38809	7645373	14.035	5.818
198	622.03	30790	39204	7762392	14.071	5.628
199	625.17	31102	39601	7880599	14.106	5.838
200	628.32	31416	40000	8000000	14.142	5.848
201	631.46	31730	40401	8120601	14.177	5.857
202	634.60	32047	40804	8242408	14.212	5.867
203	637.74	32365	41209	8365427	14.247	5.877
204	640.88	32685	41616	8489664	14.282	5.886
205	644.02	33006	42025	8615125	14.317	5.896
206	647.16	33329	42436	8741810	14.352	5.905
207	650.31	33653	42849	8869743	14.387	5.915
208	653.45	33979	43264	8998912	14.422	5.924
209	656.59	34307	43681	9129329	14.456	5.934
210	659.73	34636	44100	9261000	14.491	5.943
211	662.87	34966	44521	9393931	14.525	5.953
212	666.01	35299	44944	9528128	14.360	5.962
213	609.16	35632	45369	9663597	14.594	5.972
214	672.30	35968	45796	9800344	14.628	5.981
215	675.44	36305	46225	9938375	14.662	5.990
216	678.58	36643	46656	10077696	14.696	6.000
217	681.72	36983	47089	10218313	14.730	6.009
218	684.86	37325	47524	10360232	14.764	6.018
219	688.01	37668	47961	10503459	14.798	6.027
220	691.15	38013	48400	10648000	14.832	6.036
221	694.29	38359	48841	10793861	14.866	6.045
222	697.43	38707	49284	10941048	14.899	6.055
223	700.57	39057	49729	11089567	14.933	6.064
224	703.71	39408	60176	11239424	14.966	6.073
225	706.86	39760	50625	11390625	15.000	6.082
226	710.00	40115	51076	11543176	15.033	6.091
227	713.14	40470	51529	11697083	15.066	6.100
228	716.28	40828	51984	11852352	15.099	6.109
229	719.42	41187	62441	12008989	15.132	6.118
230	722.56	41547	52900	12167000	15.165	6.126
231	725.70	41909	53361	12326391	15.198	6.135
232	728.85	42273	63824	12487168	15.231	6.144
233	731.99	42638	54289	12649337	15.264	6.153
234	735.13	43005	54756	12812904	15.297	6.162
235	738.27	43373	55225	12977875	15.329	6.171
236	741.41	43743	55696	13144256	15.362	6.179
237	744.55	44115	56169	13312053	15.394	6.188
238	747.70	44488	56644	13481272	15.427	6.197
239	750.84	44862	57121	13651919	15.459	6.205
240	753.98	45239	57600	13824000	15.491	6.214
241	757.12	45616	58081	13997521	15.524	6.223
242	760.26	45996	58564	14172488	15.556	6.231
243	763.40	46377	59049	14348907	15.588	6.240
244	766.56	46759	59536	14526784	15.620	6.248
245	769.69	47143	60025	14706125	16.652	6.257
246	772.83	47529	60516	14886936	15.684	6.265
247	775.97	47916	61009	15069223	15.716	6.274
248	779.11	48305	61504	15252992	16.748	6.282
249	782.25	48695	62001	15438249	15.779	6.291
250	786.40	49087	62500	15625000	16.811	6.299

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
251	788.54	49481	63001	15813251	15.842	6.307
252	791.68	49876	63504	16003008	15.874	6.316
253	794.82	50272	64009	16194277	15.905	6.324
254	797.96	50670	64516	16387064	15.937	6.333
255	801.10	51070	65025	16581375	15.968	6.341
256	804.24	51471	65536	16777216	16.000	6.349
257	807.39	51874	66049	16974593	16.031	6.357
258	810.53	52279	66564	17173512	16.062	6.366
259	813.67	52685	67081	17373979	16.093	6.374
260	816.81	53093	67600	17576000	16.124	6.382
261	819.97	53502	68121	17779581	16.155	6.390
262	823.09	53912	68644	17984728	16.186	6.398
263	826.24	54325	69169	18191447	16.217	6.406
264	829.38	54739	69696	18399744	16.248	6.415
265	832.52	55154	70225	18609625	16.278	6.423
266	835.66	55571	70756	18821096	16.309	6.431
267	838.80	55990	71289	19034163	16.340	6.439
268	841.94	56410	71824	19248832	16.370	6.447
269	845.09	56832	72361	19465109	16.401	6.455
270	848.23	57255	72900	19683000	16.431	6.463
271	851.37	57680	73441	19902511	16.462	6.471
272	854.51	58107	73984	20123648	16.492	6.479
273	857.65	58535	74529	20346417	16.522	6.487
274	860.79	58964	75076	20570824	16.552	6.495
275	863.94	59395	75625	20796875	16.583	6.502
276	867.08	59828	76176	21024576	16.613	6.510
277	870.22	60262	76729	21253933	16.643	6.518
278	873.36	60698	77284	21484952	16.673	6.526
279	876.50	61136	77841	21717639	16.703	6.534
280	879.64	61575	78400	21952000	16.733	6.542
281	882.78	62015	78961	22188041	16.763	6.549
282	885.93	62458	79524	22425768	16.792	6.557
283	889.07	62901	80089	22665187	16.822	6.565
284	892.21	63347	80656	22906304	16.852	6.573
285	895.35	63794	81225	23149125	16.881	6.580
286	898.49	64242	81796	23393656	16.911	6.588
287	901.63	64692	82369	23639903	16.941	6.596
288	904.78	65144	82944	23887872	16.970	6.603
289	907.92	65597	83521	24137569	17.000	6.611
290	911.06	66052	84100	24389000	17.029	6.619
291	914.20	66508	84681	24642171	17.059	6.627
292	917.34	66966	85264	24897088	17.088	6.634
293	920.48	67425	85849	25153757	17.117	6.642
294	923.63	67886	86436	25412184	17.146	6.649
295	926.77	68349	87025	25672375	17.176	6.657
296	929.91	68813	87616	25934336	17.205	6.664
297	933.05	69279	88209	26198073	17.234	6.672
298	936.19	69746	88804	26463592	17.263	6.679
299	939.33	70215	89401	26730899	17.292	6.687
300	942.48	70686	90000	27000000	17.320	6.694
301	945.62	71158	90601	27270901	17.349	6.702
302	948.76	71631	91204	27543608	17.378	6.709
303	951.90	72106	91809	27818127	17.407	6.717
304	955.04	72583	92416	28094464	17.436	6.724
305	958.18	73061	93025	28372625	17.464	6.731
306	961.32	73541	93636	28652616	17.493	6.739
307	964.47	74023	94249	28934443	17.521	6.746
308	967.61	74506	94864	29218112	17.549	6.753
309	970.75	74990	95481	29503629	17.578	6.761
310	973.89	75476	96100	29791000	17.607	6.768
311	977.03	75964	96721	30080231	17.635	6.775
312	980.17	76453	97344	30371328	17.663	6.782
313	983.32	76944	97969	30664297	17.692	6.789
314	986.45	77437	98596	30959144	17.720	6.797
315	989.60	77931	99225	31255875	17.748	6.804
316	992.74	78426	99856	31554496	17.776	6.811
317	995.88	78924	100489	31855013	17.804	6.818
318	999.02	79422	101124	32157432	17.832	6.826
319	1002.17	79923	101761	32461759	17.860	6.833
320	1005.31	80424	102400	32768000	17.888	6.839
321	1008.45	80928	103041	33076161	17.916	6.847
322	1011.59	81433	103684	33386248	17.944	6.854
323	1014.73	81939	104329	33698267	17.972	6.861
324	1017.88	82448	104976	34012224	18.000	6.868
325	1021.02	82957	105625	34328125	18.028	6.875
326	1024.16	83469	106276	34645976	18.055	6.882
327	1027.30	83982	106929	34965783	18.083	6.889
328	1030.44	84496	107584	35287552	18.111	6.896
329	1033.58	85012	108241	35611289	18.138	6.903
330	1036.72	85530	108900	35937000	18.166	6.910
331	1039.86	86049	109561	36264691	18.193	6.917
332	1043.01	86569	110224	36594368	18.221	6.924
333	1046.15	87092	110889	36926037	18.248	6.931
334	1049.29	87616	111556	37259704	18.276	6.938
335	1052.43	88141	112225	37595375	18.303	6.945
336	1055.57	88668	112896	37933056	18.330	6.952
337	1058.71	89197	113569	38272753	18.357	6.959
338	1061.86	89727	114244	38614472	18.385	6.966
339	1065.00	90258	114921	38958219	18.412	6.973
340	1068.14	90792	115600	39304000	18.439	6.979
341	1071.28	91327	116281	39651821	18.466	6.986
342	1074.42	91863	116964	40001688	18.493	6.993
343	1077.56	92401	117649	40353607	18.520	7.000
344	1080.71	92941	118336	40707584	18.547	7.007
345	1083.85	93482	119025	41063625	18.574	7.014
346	1086.99	94024	119716	41421736	18.601	7.020
347	1090.13	94569	120409	41781923	18.628	7.027
348	1093.27	95115	121104	42144192	18.655	7.034
349	1096.41	95662	121801	42508549	18.681	7.040
350	1099.56	96211	122500	42875000	18.708	7.047
351	1102.70	96762	123201	43243551	18.735	7.054
352	1105.84	97314	123904	43614208	18.762	7.061
353	1108.98	97867	124609	43986977	18.788	7.067
354	1112.12	98423	125316	44361864	18.815	7.074
355	1115.26	98980	126025	44738875	18.842	7.081
356	1118.40	99538	126736	45118016	18.868	7.087
357	1121.55	100098	127449	45499293	18.894	7.094
358	1124.69	100660	128164	45882712	18.921	7.101
359	1127.83	101223	128881	46268279	18.947	7.107
360	1130.97	101787	129600	46656000	18.974	7.114
361	1134.11	102354	130321	47045881	19.000	7.120
362	1137.25	102921	131044	47437928	19.026	7.127
363	1140.40	103491	131769	47832147	19.052	7.133
364	1143.54	104062	132496	48228544	19.079	7.140
365	1146.68	104634	133225	48627125	19.105	7.146
366	1149.82	105209	133956	49027896	19.131	7.153
367	1152.96	105784	134689	49430863	19.157	7.159
368	1156.10	106362	135424	49836032	19.183	7.166
369	1159.25	106940	136161	50243409	19.209	7.172
370	1162.39	107521	136900	50653000	19.235	7.179
371	1165.53	108103	137641	51064811	19.261	7.185
372	1168.67	108686	138384	51478848	19.287	7.192
373	1171.81	109271	139129	51895117	19.313	7.198
374	1174.95	109858	139876	52313624	19.339	7.205
375	1178.10	110446	140625	52734375	19.365	7.211
376	1181.24	111038	141376	53157376	19.391	7.218
377	1184.38	111628	142129	53582633	19.416	7.224
378	1187.52	112221	142884	54010152	19.442	7.230
379	1190.66	112815	143641	54439939	19.468	7.237
380	1193.80	113411	144400	54872000	19.493	7.243

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
381	1196.94	114009	145161	55306341	19.519	7.249
366	1200.09	114606	145924	55742968	18.545	7.256
583	1203.23	115209	146689	58161867	19.570	7.262
884	1206.37	115611	147456	56625104	19.598	7.268
365	1209.51	116415	148225	57066625	19.621	7.275
386	1212.65	117021	148996	57512456	19.647	7.281
387	1213.78	117626	149769	57960603	19.072	7.267
386	1216.94	116237	150544	58411072	19.698	7.294
389	1222.06	116647	151321	58863869	19.723	7.299
360	1225.22	118458	152100	59819000	18.748	7.306
391	1226.36	120072	152881	59776471	18.774	7.312
392	1251.50	120687	155664	60256288	18.799	7.319
393	1234.64	121304	154449	60696457	19.824	7.325
394	1237.78	121922	155236	61162984	18.849	7.331
395	1240.93	122542	156025	61629675	19.875	7.337
396	1244.07	123163	156816	62099136	19.899	7.343
397	1247.21	123786	157609	62570773	19.923	7.349
396	1250.35	124410	158404	63044792	19.949	7.356
399	1253.49	125036	159201	63521199	18.975	7.362
400	1256.64	125664	160000	64000000	20.000	7.368
401	1259.78	126293	160601	64481201	20.025	7.574
402	1262.92	126923	161604	64964608	29.049	7.380
403	1266.06	127556	162409	65450827	20.073	7.386
404	1268.20	128188	163216	65839264	20.099	7.392
403	1272.34	129625	164025	66430125	20.125	7.399
406	1275.46	129462	164836	66923416	20.149	7.405
407	1276.63	130100	165649	67419143	29.174	7.411
408	1281.77	130740	166464	67911312	20.199	7.417
409	1284.91	131382	167281	06417929	20.224	7.422
410	1288.06	132025	168100	68921000	20.248	7.429
411	1291.18	132670	168921	69426531	20.275	7.434
412	1294.64	133316	169744	69934528	20.296	7.441
413	1297.48	133964	170569	70444997	20.322	7.447
414	1300.62	134614	171396	70937944	29.347	7.453
415	1303.79	135265	172225	71473675	20.371	7.459
416	1306.90	135918	173056	71991296	20.396	7.463
417	1310.64	136572	173889	72511713	20.421	7.471
418	1313.19	197226	174724	73034632	20.443	7.477
419	1316.32	137665	175561	73560059	20.469	7.483
420	1319.47	139544	176400	74088000	20.484	7.489
421	1322.91	139265	177241	74618461	20.316	7.493
422	1325.73	139667	178084	75151446	20.543	7.501
423	1328.69	140330	178929	73686967	20.567	7.507
424	1332.03	141196	179776	76225024	20.591	7.313
425	1333.18	141662	160625	79763625	20.615	7.518
426	1338.32	142531	181476	77308776	20.639	7.524
427	1341.46	143201	182329	77654485	20.664	7.550
426	1344.60	145872	163184	76402752	20.686	7.536
429	1347.74	144345	184041	78933369	20.712	7.542
430	1350.68	145220	184900	79507000	20.736	7.548
431	1354.02	143896	185761	60062991	20.760	7.554
462	1337.17	146374	166624	60621566	20.785	7.559
483	1360.32	147233	187469	81162737	20.809	7.363
494	1363.43	147934	188356	61746504	20.833	7.571
435	1366.39	146617	169225	62312875	20.637	7.577
436	1369.73	149301	190096	82881856	20.881	7.583
437	1372.67	149987	190969	63453453	20.904	7.586
438	1376.02	150674	191844	64027672	20.928	7.394
439	1379.16	151362	192721	64604319	20.952	7.900
440	1382.30	152053	193900	65184000	20.976	7.606
441	1385.44	162746	194461	89766121	21.000	7.912
442	1388.38	153438	195364	86350988	21.024	7.617
443	1391.72	134133	196249	96936307	21.047	7.925
444	1394.97	154830	197136	87528384	21.071	7.929
445	1398.01	455528	198025	88121125	21.095	7.935
446	1401.15	156228	198916	68716536	21.119	7.940
447	1404.29	156929	198609	69314623	21.142	7.648
448	1407.43	157632	200704	89915392	21.166	7.652
449	1410.37	156337	201601	90518849	21.189	7.837
450	1413.72	159043	202500	91125000	21.213	7.663
431	1416.86	159751	203401	91733831	21.237	7.969
432	1420.00	160469	204304	92345406	21.260	7.674
453	1426.14	161171	205209	92939677	21.264	7.660
434	1426.26	161683	206106	93376664	21.307	7.689
455	1429.42	162397	207025	94196373	21.331	7.691
456	1432.56	163312	207936	94816616	21.354	7.897
437	1435.71	164030	206849	95443993	21.377	7.708
438	1438.85	164748	209764	96071912	21.401	7.708
439	1441.99	165466	210681	96702579	21.424	7.714
460	1443.13	166190	211600	97336000	21.447	7.719
461	1448.27	198915	212521	97972161	21.471	7.725
462	1451.41	197638	213444	96611126	21.494	7.731
463	1454.34	168363	214369	99232847	21.317	7.739
464	1437.70	169093	213296	99897344	21.341	7.742
465	1460.84	169823	216225	100544625	21.564	7.747
466	1463.96	170334	217136	101194696	21.587	7.753
467	1467.12	171287	218069	101847363	21.010	7.759
466	1470.26	172021	219024	102503232	21.633	7.764
469	1473.41	172757	219961	103161709	21.656	7.768
470	1476.55	173494	220900	103823000	21.679	7.775
471	1479.69	174233	221941	104487111	21.702	7.780
472	1462.83	174974	222764	105154046	21.723	7.769
473	1463.97	173716	223729	103823817	21.749	7.791
474	1489.11	176460	224676	106496424	21.771	7.897
475	1492.26	177205	223625	107171875	21.794	7.802
476	1495.40	177952	226576	107850176	21.817	7.608
477	1498.54	178701	227329	108531333	21.840	7.813
476	1501.68	179431	228464	108215332	21.865	7.818
479	1504.82	180202	229441	109902238	21.886	7.824
480	1507.96	180956	230400	110592000	21.909	7.630
481	1311.10	181710	231361	111284641	21.932	7.833
462	1314.23	182467	232324	111980166	21.954	7.840
483	1517.39	183225	233269	112676567	21.977	7.849
484	1320.53	183984	234236	113379904	22.000	7.631
485	1323.67	184745	233225	114084125	22.023	7.857
486	1326.81	185308	236196	114791236	22.045	7.662
487	1329.06	186272	237169	113301303	22.069	7.868
488	1533.10	167036	238144	116214272	22.091	7.873
489	1336.24	187805	239121	116930169	22.113	7.878
490	1339.36	188374	240100	117649000	22.136	7.884
491	1342.32	189345	241061	118370771	22.139	7.869
492	1345.66	190117	242064	119095486	22.181	7.694
493	1548.80	190890	243049	119823137	22.204	7.699
494	1331.95	191665	244036	120533784	22.226	7.905
495	1335.09	192442	215025	121287375	22.218	7.910
496	1538.23	193220	246016	122023936	22.271	7.815
497	1561.37	194000	247009	122763473	22.293	7.921
498	1364.31	194762	248004	123505992	22.316	7.926
499	1567.65	195563	219001	124251499	22.338	7.832
500	1570.80	196350	250000	125000000	22.361	7.937
301	1573.94	197136	251001	125751501	22.383	7.942
502	1377.08	197923	252004	126506008	22.403	7.947
303	1580.22	198713	253009	127263327	22.428	7.953
304	1583.36	199504	254016	128024064	22.449	7.958
505	1586.30	200296	255025	128787625	22.472	7.963
506	1589.64	201090	256036	129554216	22.494	7.969
507	1592.79	201686	257049	130323843	22.517	7.974
506	1595.93	202683	258064	131096512	22.539	7.879
509	1599.07	203461	259061	161872229	22.561	7.884
510	1602.21	204262	260100	132651000	22.583	7.969

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
11	1605.85	205084	261121	133432831	22.605	7.995
12	1606.48	205887	262144	134217728	22.627	2.000
13	1611.94	206692	293182	135005697	22.648	8.005
14	1614.78	207489	284196	135796744	22.871	8.010
15	1617.92	208307	265225	138390873	22.694	2.018
16	1821.06	209117	268258	137388096	22.716	8.021
17	1624.20	209928	267289	138188413	22.738	8.026
18	1827.34	210741	268324	138991832	22.739	8.631
18	1630.48	211558	269361	139798338	22.782	8.638
20	1633.93	212372	270400	140608000	22.808	2.041
21	1636.77	213188	271441	141420781	22.825	8.047
22	1839.91	214008	272464	142236848	22.847	8.032
13	1643.05	214829	273328	143055667	22.869	8.037
14	1648.18	215651	274578	143877624	22.891	8.062
23	1849.34	218475	275623	144703125	22.913	8.067
18	1852.48	217301	276676	143531576	22.935	8.072
27	1638.92	218128	277729	146363183	22.956	8.077
18	1838.78	216936	278784	147197932	22 978	8.082
28	1891.90	219787	279841	148033889	23.000	8.087
30	1685.04	220618	280900	148877000	23.022	8.093
51	1688.18	221452	281961	149721291	23.043	8.098
32	1671.33	222287	283024	150568768	23.063	8.103
33	1674.47	223123	284089	131419437	23.087	8.108
54	1277.91	223961	283139	132273304	23.108	8.113
63	1880.75	224801	286223	153130373	23.130	6.118
36	1883.89	225642	287296	153990658	23.152	8.123
57	1887.04	226484	288369	154654135	23.173	8.128
38	1690.18	227320	289444	135720872	23.195	8.133
39	1893.32	228175	290521	156390818	23.219	8.138
40	1896.46	229022	281600	187464000	23.238	8.143
41	1899.90	229871	292681	158340421	23.259	8.148
42	1702.74	230722	293784	139220088	23 281	8.133
43	1705.82	231374	294849	160103007	23 302	8.138
44	1709.08	232428	293938	160989184	23.324	8.163
48	1712.17	233263	297023	191878628	23.343	8.188
46	1713.31	234140	298116	162771338	23.367	8.173
47	1718.43	234888	299209	183887328	23.888	8.178
42	1721.59	238838	300304	184568892	23.409	8.183
49	1724.73	236720	301401	183469148	23.431	8.188
50	1727.88	237383	302300	166375000	23.482	8.123
81	1731.02	238448	303601	127284151	23.473	8.198
52	1734.19	232314	304704	188196608	23.495	8.203
58	1737.30	240182	305800	188112377	23.518	8.208
54	1740.44	241051	306918	170631464	23.837	8.213
55	1743.56	241822	308025	170933873	23.838	6.218
56	1746.72	242798	302138	171879618	23.379	8.223
57	1740.87	243689	310248	172808623	23.601	8.228
28	1783.01	244545	311384	173741112	23.622	8.233
89	1756.18	245422	312481	174678872	23.643	8.236
60	1759.29	246301	313800	173818000	23.664	8.242
61	1762.43	247161	314721	176338481	23.885	8.247
82	1768.57	248063	315844	177504328	23.706	8.232
23	1768.72	248847	318289	178453347	23.728	8.237
84	1771.88	248832	318096	179406144	23.749	8.262
85	1775.00	250718	819223	180362123	23.769	8.287
66	1778.14	251607	320358	181321496	23.791	8.272
97	1781 28	252497	321469	182284263	23.812	8.277
88	1784.42	233388	322624	183250432	23.833	8.282
88	1787.37	234281	323761	184220009	23.854	8.298
70	1790.71	235178	324900	183193000	23.873	8.291
71	1795.85	256072	326041	188162411	25.806	8.296
72	1796.99	256970	327184	187149248	23.916	8.301
73	1800.13	257899	328329	188132517	23.937	8.309
74	1808.27	252770	328476	122112224	28.958	8.311
75	1806.42	259672	330625	190109372	23.979	8.318

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
379	1808.52	260578	831776	191102876	24.000	8.320
577	1812.70	261482	832929	192100033	24.021	8.325
878	1818.84	282388	384084	193100552	24.042	8.330
378	1818.98	283298	333241	194104588	24.082	8.338
880	1822.12	264208	836400	195112000	24.083	2.330
581	1828.28	265120	337561	196122941	24.104	9.344
582	1828.41	286033	338724	197187368	24.125	8.349
583	1831.58	266248	339889	198155287	24.148	2.854
584	1834.89	287893	341058	199176704	24.166	2.889
583	1837.83	268783	342225	200201625	24.187	8.363
586	1840.97	299703	343396	201230056	24.207	8.368
527	1844.11	270624	344569	202262003	24.228	2.373
588	1847.28	271347	343744	203297472	24.249	2.378
589	1850.40	272471	348921	204336468	24.289	8.382
590	1853.54	273397	348100	205379000	24.229	8.387
581	1856.88	274323	349281	206425071	24.310	2.392
892	1859.82	273254	330464	207474688	24.331	8.397
593	1892.96	278185	331648	208327837	24.331	2.401
594	1866.11	277117	332836	209384384	24.372	2.406
595	1869.25	278051	334025	210644873	24 393	8.411
396	1872.39	278886	333219	211708736	24.413	8.415
887	1873.53	279923	356409	212776173	24.433	8.420
898	1878.87	280862	357604	213847192	24.454	8.425
599	1881.81	281802	338801	214921799	24.474	8.428
600	1884.96	282744	360000	218000000	24.425	8.434
601	1888.10	283687	361201	217081801	24.515	8.422
902	1891.24	284632	362404	218197208	24.336	8.444
603	1894.38	285578	363609	219236227	24.556	8.448
604	1897.32	266528	364818	220348864	24.576	8.453
603	1900.66	287476	366025	221445125	24.597	8.458
606	1903.80	288426	367236	222545016	24.817	8.462
607	1906.93	289378	368448	223648543	24.837	8.467
608	1810.09	290334	369664	224793712	24.638	8.472
609	1913.23	291289	370881	225866829	24.878	8.472
610	1918.37	292247	372100	226881000	24.698	8.481
611	1918.31	283206	373321	228099181	24.718	8.482
612	1822.95	294166	374544	229220928	24.738	8.490
813	1923.80	298128	373789	230346897	24.738	8.485
214	1928.94	296092	376096	231475544	24.779	8.490
815	1932.08	297057	378225	232608373	24.799	8.504
918	1933.22	298024	378456	233744896	24.818	6.500
217	1938.36	298993	380689	234883115	24.839	8.513
618	1941.50	299963	381924	236028032	24 859	8.818
619	1944.83	300834	383161	237178888	24.879	8.522
820	1947.79	301907	384400	238328000	24.889	8.327
221	1950.93	302882	385641	288483061	24.919	8.332
922	1954.07	303858	389884	240641848	24.938	8.536
623	1957.21	304856	388129	241804387	24.959	8.541
824	1960.33	305815	382376	242870624	24.980	8.545
625	1963.50	308796	392625	244140625	25.000	8.549
929	1966.84	307779	381876	245314378	25.019	8.554
827	1969.78	308793	383129	246491883	25.040	8.552
928	1972.92	309749	384384	247878152	25.052	6.563
629	1976.06	310738	385641	248838189	28.079	8.568
630	1979.20	311728	896900	250047000	25.099	8.573
831	1982.34	312715	398181	231238591	25.119	8.877
632	1985.48	313707	399424	232433968	25.139	8.382
933	1988.83	314701	400689	233836137	23.159	8.589
234	1991.77	313696	401956	254840104	25.179	8.581
633	1994.91	316692	403225	256047875	23.199	8.595
238	1998.05	317991	404496	257259456	28.219	8.599
637	2001.19	318690	408789	258474853	23.239	8.604
838	2004.34	319692	407044	259694072	28.259	8.609
239	2007.48	320628	408321	260917119	25.272	8.613
640	2010.62	321299	409600	262144000	25.298	8.612

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
641	2013.76	322705	410881	263374721	25.318	8.622
642	2016.90	323713	412164	264609288	25.338	8.627
643	2020.04	324722	413449	265847707	25.357	8.631
644	2023.19	325733	414736	267089984	25.377	6.636
645	2026.33	326746	416025	268336123	25.397	6.640
646	2029.47	327759	417316	269586136	25.416	8.644
647	2032.61	328775	418609	270840023	25.436	8.649
648	2035.78	329792	419904	272097792	25.456	8.653
649	2038.89	330811	421201	273359449	25.475	8.658
650	2042.04	331831	422500	274625000	25.495	8.662
651	2045.18	332853	423801	275894451	23.515	8.667
652	2046.32	333876	425104	277167608	25.534	8.671
853	2051.46	334901	426409	278445077	25.554	8.676
654	2054.60	335928	427716	279728264	25.573	8.680
653	2057.74	336956	429025	281011375	23.593	8.684
656	2060.88	337985	430336	282300416	25.612	8.689
657	2064.03	339017	431649	283593393	25.632	8.893
656	2067.17	340049	432964	284890312	25.651	8.898
659	2070.31	341084	434281	286191179	23.671	8.702
660	2073.45	342120	435600	287496000	25.690	8.706
661	2076.59	343157	436921	288804781	25.710	8.711
662	2079.73	344196	438244	290117528	25.729	8.715
663	2082.88	345237	439569	291434247	25.749	6.719
664	2086.02	346279	440898	292754944	25.768	8.724
665	2089.16	347323	442225	294079625	25.787	8.728
666	2092.30	348368	443556	295408296	25.807	8.733
667	2005.44	349416	444889	296740963	25.826	8.737
668	2098.58	350464	446224	298077632	25.846	8.742
669	2101.73	351514	447561	299418309	25.865	8.746
870	2104.87	352566	448900	300763000	25.884	8.750
671	2108.01	333619	450241	302111711	25.904	8.753
672	2111.15	354674	431564	303464448	25.923	8.759
673	2114.29	353730	452929	304821217	25.942	8.763
674	2117.43	356788	454276	306182024	25.961	8.768
673	2120.58	357847	455625	307546875	25.981	8.772
676	2123.72	358908	456976	308915776	26 000	8.776
677	2126.86	359971	458329	310288733	26.019	8.781
678	2130.00	361033	459684	311665752	26.038	8.785
679	2133.14	362101	461041	313046839	26.058	8.789
880	2136.28	363168	462400	314432000	26.077	8.794
681	2139.42	364237	463761	315821241	26.096	8.798
682	2142.57	365308	465124	317214568	26.115	8.802
683	2145.71	366380	466489	318611987	26.134	8.807
684	2148.85	367454	467856	320013504	26.153	8.811
685	2151.99	368529	469225	321419125	26.172	8.815
686	2155.13	369605	470596	322828856	26.192	8.819
687	2158.27	370684	471969	324242703	26.211	8.824
688	2161.42	371764	473344	325660672	28.229	8.828
689	2164.56	372845	474721	327082769	26.249	8.832
690	2167.70	373928	476100	328509000	26.268	8.836
691	2170.84	375013	477481	329939371	26.287	8.841
692	2173.98	376099	478864	331373888	26.306	8.845
693	2177.12	377187	480249	332812557	26.325	8.849
694	2180.27	376276	481636	334255384	26.344	8.853
695	2183.41	379367	483025	333702375	26.363	8.858
696	2186.55	380460	484416	337153536	26.382	8.862
697	2189.69	381554	485809	338608873	26.401	8.866
698	2192.83	382630	487204	340068392	26.419	8.870
699	2195.97	363747	466601	341532099	26.439	8.875
700	2199.12	384846	490000	343000000	26.457	8.879
701	2202.28	383945	491401	344472101	26.476	8.883
702	2205.40	387048	492804	343946408	26.495	6.887
703	2208.54	388151	494209	347428927	26.514	8.892
704	2211.66	389256	495616	548913664	26.553	8.696
705	2214.82	390363	497025	350402625	26.552	8.900

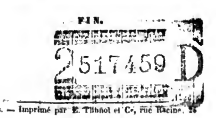
Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
706	2217.96	391471	498436	351895816	26.571	8.904
707	2221.11	392581	499849	353393913	26.569	8.908
708	2224.25	393692	501264	354894912	26.608	8.913
709	2227.39	394805	502691	356400829	26.627	8.917
710	2230.53	395920	504100	357911000	26.643	8.921
711	2233.67	397036	505521	359425431	26.664	8.925
712	2236.81	398151	506944	360944128	26.683	8.929
713	2239.96	399273	506369	362467097	26.702	8.934
714	2243.10	400393	509796	363994544	26.721	6.938
715	2246.24	401516	511225	363525875	26.739	8.942
716	2249.38	402640	512656	367061696	26.758	6.946
717	2252.52	403765	514089	368601813	26.777	8.950
718	2255.66	401892	515524	370146232	26.795	8.954
719	2258.81	406021	516961	371694959	26.814	8.959
720	2261.95	407131	518400	373248000	26.833	8.963
721	2265.09	408283	519841	374805361	26.851	8.967
722	2268.23	409418	521284	376367048	26.870	8.971
723	2271.37	410551	522729	377933067	26.889	8.975
724	2274.51	411687	324176	379503424	26.907	8.979
725	2277.66	412625	525625	381078125	26.926	8.983
726	2280.80	413965	527076	382657176	26.944	8.988
727	2283.94	415106	528529	384240583	26.963	8.992
728	2287.08	416249	529984	385828352	26.981	8.996
729	2290.22	417393	531441	387420489	27.000	9.000
730	2293.36	418339	532900	389017000	27.018	9.004
731	2298.50	419687	534361	390617891	27.037	9.008
732	2299.65	420836	535824	392223168	27.055	9.012
733	2302.79	421986	537289	393832837	27.074	9.016
734	2305.93	423138	538756	395446904	27.092	9.020
735	2309.07	424292	540225	397065375	27.111	9.023
736	2312.21	425442	541696	398688256	27.129	9.029
737	2315.35	426604	543169	400315553	27.148	9.033
738	2316.50	427763	544644	401947272	27.166	9.037
739	2321.64	428923	546121	403583419	27.184	9.041
740	2324.78	430083	347600	405224000	27.203	9.043
741	2327.92	431248	549081	406869021	27.221	9.049
742	2331.06	432412	550564	408518488	27.239	9.033
743	2334.20	433579	552049	410172407	27.258	9.057
744	2337.35	434747	553536	411830784	27.276	9.061
745	2340.49	435916	555025	413493625	27.295	9.065
746	2343.63	437087	356516	415160936	27.313	9.069
747	2346.77	438260	558009	416832723	27.331	9.073
748	2349.91	439434	539504	418508992	27.349	9.077
749	2353.05	440610	561001	420189749	27.368	9.081
750	2356.20	441787	562500	421875000	27.386	9.086
751	2359.34	442966	564001	423564751	27.404	9.089
752	2362.48	444146	565504	425259008	27.423	9.094
753	2365.62	445328	567009	428957777	27.441	9.098
754	2368.76	446512	368516	428661064	27.439	9.102
755	2371.90	447697	570025	430368875	27.477	9.106
756	2375.04	448684	571536	432081216	27.493	9.109
757	2378.19	450072	573049	433798093	27.514	9.114
758	2381.33	451262	574564	435519512	27.532	9.118
759	2384.47	452454	376061	437245479	27.549	9.122
760	2387.61	453847	577600	438976000	27.568	9.126
761	2390.75	454841	579121	440711081	27.586	9.129
762	2393.89	456037	580644	412450728	27.604	9.134
763	2397.04	457233	382169	444194947	27.822	9.138
764	2400.18	458435	583696	445943744	27.640	9 142
765	2403.32	459635	585225	447697125	27.659	9.146
766	2406.46	460638	566756	449455096	27.677	9.149
767	2409.60	462042	388289	451217663	27.695	9.154
768	2412.74	463247	369824	452984832	27.713	9.158
769	2415.88	464454	391381	454756609	27.731	9.162
770	2419.03	465665	592900	456533000	27.749	9.166

Nombres.	Circonférence	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
771	2422.17	466873	594441	458314011	27.767	9.170
772	2425.31	468085	595984	460099648	27.783	9.174
773	2426.45	469299	597529	461889917	27.603	9.178
774	2431.59	470514	599076	463684824	27.821	9.182
775	2434.74	471730	600625	465484375	27.639	9.183
776	2437.66	472949	602176	467288576	27.657	9.169
777	2441.02	474168	603729	469097433	27.673	9.193
778	2444.16	475390	605284	470910952	27.893	9.197
779	2447.30	476612	606841	472729139	27.911	9.201
780	2450.44	477837	608400	474532000	27.928	9.205
761	2453.58	479063	609961	476379541	27.946	9.209
782	2456.73	480290	611524	478211768	27.964	9.213
763	2459.87	481520	613089	480048687	27.982	9.217
784	2463.01	482730	614656	481890304	28.000	9.221
785	2466.15	483983	616225	483736623	28.018	9.225
786	2469.29	485216	617796	485387656	28.036	9.229
787	2472.43	486452	619369	487443403	28.054	9.233
788	2475.58	487689	620944	489303872	28.071	9.237
789	2478.72	488927	622521	491169069	28.089	9.240
790	2481.86	490168	624100	493039000	28.107	9.244
791	2485.00	491409	625681	494913671	28.123	9.246
792	2488.14	492653	627264	496793088	28.142	9.232
793	2491.28	493898	628849	498677237	28.160	9.256
794	2494.43	495144	630436	500566184	28.178	9.260
793	2497.57	496392	632025	502459875	28.196	9.264
798	2500.71	497642	633616	504358336	28.213	9.268
797	2503.65	498893	635209	506261573	28.231	9.272
798	2506.99	500145	636804	508169592	28.249	9.273
799	2510.13	501400	638401	510082399	28.267	9.279
800	2513.28	502656	640000	512000000	28.284	9.283
601	2516.42	503913	641601	513922401	28.302	9.287
802	2519.56	505172	643204	315849608	28.320	9.291
803	2522.70	506432	644809	517781627	28.337	9.295
604	2525.84	507695	646416	519716464	28.355	9.299
805	2528.98	508958	648025	521660125	28.373	9.302
806	2532.12	510224	649636	523606616	28.390	9.306
607	2533.27	511490	651249	523557943	28.408	9.310
808	2538.41	512759	652864	527314112	28.425	9.314
809	2541.35	514029	654481	529475129	28.443	9.318
810	2544.69	515300	656100	551441000	28.460	9.322
611	2547.83	516574	657721	533411731	28.478	9.328
812	2550.97	517848	659344	535387328	28.496	9.329
813	2554.12	519125	660969	537367797	26.513	9.333
814	2557.26	520402	662596	539353144	28.531	9.337
815	2560.40	521682	664225	541343375	28.548	9.341
816	2563.54	522963	665856	543338496	28.566	9.345
817	2566.68	524245	667489	545338513	28.583	9.348
818	2569.82	525529	669124	547343432	28.601	9.352
819	2572.97	526615	670761	549353259	28.618	9.356
620	2576.11	528102	672400	551368000	28.656	9.360
821	2579.25	529391	674041	553367661	28.653	9.364
822	2582.39	530682	675684	555412248	28.671	9.368
623	2585.53	531974	677329	557441767	28.688	9.371
824	2588.67	533267	678976	559476224	28.705	9.375
825	2591.82	534562	660625	561515625	28.723	9.379
826	2394.96	535859	682276	563559976	28.740	9.383
827	2598.10	537158	683929	365609283	28.758	9.386
828	2601.24	538457	685584	567663552	28.775	9.590
829	2604.38	539759	667241	569722789	28.792	9.394
830	2607.52	541062	688900	571787000	28.610	9.398
831	2610.66	542368	690561	573856191	26.827	9.402
832	2613.81	543672	692224	575930568	28.844	9.405
833	2616.95	344980	693889	578009537	26.662	9.409
834	2620.09	546289	695556	580093704	26.679	9.415
835	2623.25	547600	697225	582182875	26.696	9.417

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
656	2626.37	348912	698896	584277056	28.914	9.420
637	2629.51	550226	700569	586378253	28.931	9.424
838	2632.64	531542	702244	588480472	28.948	9.428
839	2635.80	552839	703921	590589719	28.965	9.432
840	2638.94	354178	705600	592704000	28.983	9.433
841	2642.08	553498	707281	594823321	29.000	9.439
842	2643.22	356820	708964	596947688	29.017	9.443
843	2648.36	558143	710649	599077107	29.034	9.447
844	2651.31	559468	712336	601211584	29.052	9.450
845	2654.65	360795	714025	603351125	29.069	9.454
646	2657.79	562123	715716	605495736	29.086	9.458
847	2660.93	563452	717409	607645423	29.103	9.462
848	2664.07	564784	719104	609800192	29.120	9.465
849	2667.21	566117	720801	611960049	29.138	9.469
650	2670.36	367451	722500	614125000	29.155	9.473
851	2673.50	568787	724201	616295051	29.172	9.478
852	2676.84	370123	725904	618470208	29.189	9.480
853	2679.78	371464	727609	620650477	29.206	9.484
854	2682.92	572804	729316	622835864	29.223	9.468
855	2686.06	374147	731025	625026373	29.240	9.491
856	2689.20	575490	732736	627222016	29.257	9.495
857	2692.35	576856	734449	629422793	29.273	9.499
856	2693.49	578183	736164	631628712	29.292	9.502
839	2696.63	379531	737881	633839779	29.309	9.506
860	2701.77	580881	739600	936056000	29.326	9.310
861	2704.91	582233	741321	638277381	29.343	9.513
862	2708.05	583386	743044	640503928	29.360	9.317
863	2711.20	384941	744769	642735647	29.377	9.521
864	2714.34	586297	746496	644972344	29.394	9.524
863	2717.48	387635	748225	647214625	29.411	9.526
866	2720.62	389015	749936	649461696	29.428	9.532
867	2723.76	590376	751689	651714363	29.445	9.535
866	2726.90	591739	753424	653972032	29.462	9.539
869	2730.05	593103	755161	656234909	29.479	9.543
870	2733.19	594469	756900	658503000	29.496	9.546
871	2736.33	395856	758841	660776511	29.513	9.550
872	2739.47	597205	760384	663054848	29.530	9.554
873	2742.61	398576	762129	665338617	29.547	9.557
874	2745.73	399948	763876	667627624	29.563	9.561
875	2748.90	601321	765625	669921875	29.580	9.563
876	2752.04	602697	767376	672221376	29.597	9.568
877	2755.18	604073	769129	674526133	29.614	9.572
876	2736.32	605451	770884	676836152	29.631	9.578
879	2761.46	606832	772641	679151439	29.648	9.579
880	2764.60	608213	774400	681472000	29.665	9.583
661	2767.74	609596	776161	683797841	29.682	9.588
882	2770.89	610981	777924	686128968	29.696	9.590
883	2774.03	612367	779689	688465387	29.715	9.594
684	2777.17	613755	781456	690807104	29.732	9.597
885	2780.31	615144	783225	693134125	29.749	9.601
886	2783.45	616535	784996	695506456	29.766	9.605
887	2786.59	617928	786769	697864103	29.763	9.608
886	2789.73	619322	786544	700227072	29.799	9.612
689	2792.88	620718	790321	702595369	29.616	9.615
890	2796.02	622115	792100	704969000	29.833	9.619
891	2799.16	623514	793881	707347971	29.850	9.623
692	2802.30	624914	795664	709732266	29.666	9.626
893	2805.44	626316	797449	712121957	29.883	9.630
894	2808.59	627719	799236	714516984	29.900	9.633
893	2811.73	629124	801025	716917375	29.917	9.637
896	2814.87	630531	602816	719323156	29.933	9.641
897	2818.01	631939	804609	721734273	29.950	9.644
898	2821.15	633349	606404	724150792	29.967	9.648
899	2824.29	634760	808201	726572699	29.983	9.651
900	2827.44	636174	610000	729000000	30.000	9.655

Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.	Nombres.	Circonférence.	Surface.	Carré.	Cube.	Racine carrée.	Racine cubique.
901	2830.38	637586	811801	731452701	30.017	9.666	951	2987.66	710816	904401	860085331	30.638	9.834
902	2833.72	639004	613604	733670808	30.033	9.662	952	2990.80	711811	906604	862601408	30.654	9.637
903	2836.86	640422	613409	736314327	30.050	9.666	953	2993.94	713307	906209	865325177	30.871	9.841
904	2840.00	641641	817216	738763264	30.067	9.669	954	2997.08	714605	910116	668250664	30.887	9.844
905	2845.14	643262	619025	741217625	30.083	9.675	955	3000.22	716604	912025	870983875	30.905	9.846
906	2846.28	644684	820636	743677416	30.100	9.676	956	3006.36	717805	913936	873722816	30.919	9.851
907	2849.43	646106	622649	746142643	30.116	9.680	967	3006.51	719807	913849	676467493	30.935	9.855
906	2852.57	647334	824464	746613312	30.133	9.683	958	3009.63	720811	917764	872217912	30.952	9.658
909	2855.71	648961	826281	751089429	30.150	9.687	959	3012.79	722317	919681	881974079	30.966	9.861
910	2858,83	650389	826100	735871000	30.166	9.691	960	3016.23	723624	921600	884736000	30.984	9.865
911	2861.99	631819	829921	736058031	30.183	9.694	961	3012.07	725333	923521	887503681	31.000	2.868
912	2865.13	653231	931744	758550528	30.199	9.898	962	3022.21	726645	925444	890277128	31.016	9.872
913	2868.27	634664	833569	761048497	30.216	9.701	963	3025.36	728355	927369	893056347	31.032	9.875
914	2871.42	636120	635596	763551944	30.252	9.705	964	3028.50	729869	929296	693841344	31.048	9.879
915	2874.36	637556	837225	766060875	30.249	9.708	965	3031.64	731384	931225	898632125	31.064	9.882
916	2877.70	638994	939056	768575296	30.265	9.712	966	3034.78	732900	933156	901428696	31.081	9.885
917	2880.84	660432	840889	771095213	30.282	9.715	967	3037.92	734418	935089	904231063	31.027	9.889
918	2883.98	661675	842724	773620632	30.299	9.719	968	3041.06	735938	937024	907039232	31.113	9.892
919	2887.13	665318	844561	776151559	30.315	9.722	969	3044.21	737459	938961	909853209	31.129	9.896
920	2890.27	664762	846400	773688000	30.332	9.726	970	3047.35	738982	940000	912673000	31.145	9.899
921	2893.41	666208	848241	781229961	30.348	9.729	971	3050.49	740507	942841	915498611	31.161	9.902
922	2896.53	667633	830064	783777448	30.364	9.733	972	3053.63	742033	944784	918330048	31.177	9.906
923	2899.69	669104	851929	766330467	30.381	9.736	973	3056.77	743360	946729	921167317	31.193	9.909
924	2902.83	670353	633776	768889024	30.397	9.740	974	3069.91	743090	948676	924010424	31.209	9.913
925	2903.98	672007	855625	791453125	30.414	9.743	975	3063.06	746620	950625	926859375	31.225	9.916
926	2909.12	673461	857476	794022776	30.430	9.747	976	3066.20	748133	952576	929714176	31.241	9.919
927	2212.26	674916	859329	796597083	30 447	9.750	977	3069.34	749687	954329	932574833	31.257	9.923
928	2915.40	676373	661184	799178752	30.463	9.754	978	3072.48	731222	956484	935441352	31.273	2.926
929	2918.34	677832	663041	801765069	30.480	9.759	979	3075.62	732759	958441	938313739	31.269	9.930
930	2921.68	679292	864900	804337000	30.496	9.761	980	3076.76	734296	960400	941192000	31.303	9.933
931	2924.82	680734	866761	806954491	30.612	9.764	981	3081.90	735838	962361	244076141	31.321	9.936
932	2927.97	682217	868624	809557568	30.329	9.768	982	3063.03	737380	964324	946966168	31.337	2.940
933	2931.11	683682	870489	812166237	30.545	9.771	983	3068.19	758923	966289	949862087	31.333	9.943
934	2964.23	685146	872336	814780304	30.361	9.773	984	3091.35	760468	968256	952763904	31.369	2.946
935	2957.39	686616	874225	817400375	30.578	9.778	985	3094.47	762014	970225	955671625	31.385	9.250
936	2940.53	688083	876096	820025856	30 594	9.783	986	3097.61	763562	972196	[illegible]	31.401	9.953
937	2943.67	689536	877969	822656953	30.610	9.785	987	3100.75	765111	974169	961504803	31.417	9.956
938	2946.82	691029	879844	825293072	30.627	9.789	938	3103.89	766665	976144	964430272	31.432	9.960
939	2949.96	092503	881721	827936019	30 645	9.792	989	3107.04	768216	978121	967361669	31.448	9.963
940	2953.10	693979	863600	830584000	30.659	9.796	990	3110.18	769770	980100	970299000	31.464	9.967
941	2936.24	695436	885481	833237621	30.676	9.799	991	3113.32	771326	982081	973242271	31.480	9.970
942	2939.38	696935	887364	835896888	30 692	9.803	992	3116.46	742883	984064	976191488	31.496	9.973
943	2962.52	696416	889249	838561807	30.708	9.806	993	3119.60	774442	986049	979146657	31.512	9.977
944	2965.67	699898	891136	841232384	30.725	9.810	994	3122.75	776003	988036	982107784	31.528	9.980
945	2968.61	701381	893025	843908625	30.741	9.815	995	3125.89	777565	990025	985074875	31.544	9.983
946	2971.95	702867	894916	846590536	30.757	9.817	996	3129.03	779129	992016	988047936	31.559	9.987
947	2973.09	704352	896809	849276123	30.773	9.820	997	3132.17	780693	994009	991026973	31.575	9.990
948	2976.23	705641	896704	851971392	30.790	9.824	998	3135.31	782260	996004	994011992	31.591	9.993
949	2981.37	707332	900601	834670349	30.606	9.827	999	3138.45	783829	998001	997002999	31.607	9.997
950	2984.32	708823	902500	637373000	30.622	9.830	1000	3141.59	785399	1000000	1000000000	31.623	10.000

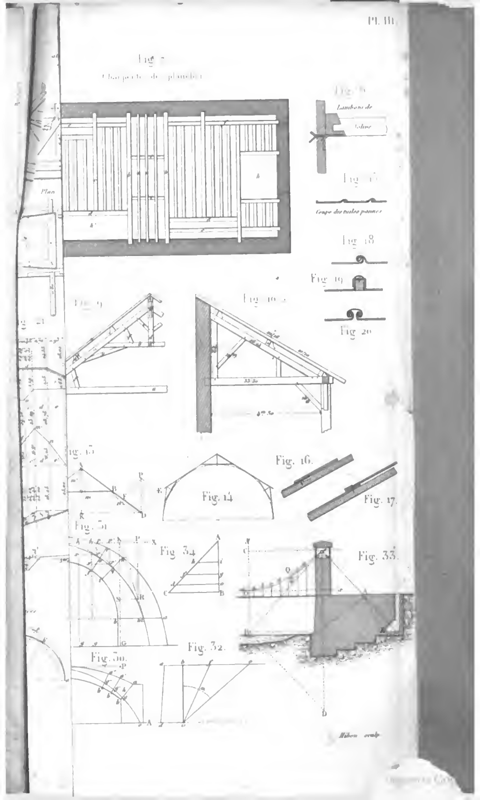
FIN.

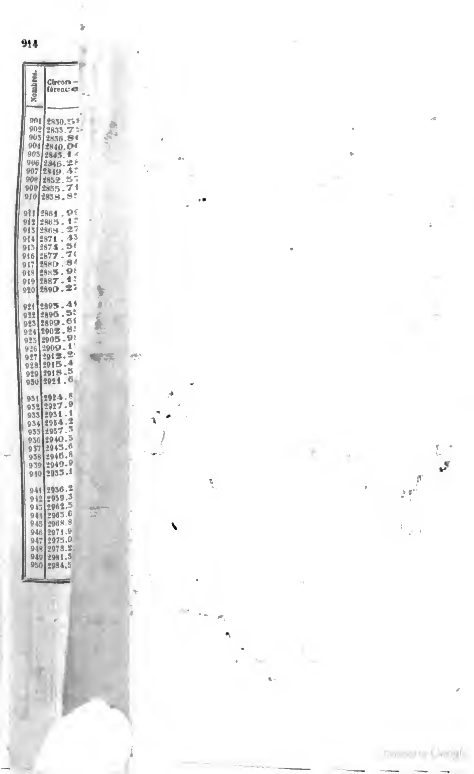


Paris. — Imprimé par E. Thunot et Ce, rue Racine, 26

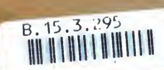


Nombres.	Circonférence.	S…
901	2830.58	6
902	2833.72	6
905	2836.56	6
904	2840.00	6
903	2843.14	6
906	2846.28	6
907	2849.45	6
906	2852.57	6
909	2855.71	6
910	2858,85	6
911	2861.99	6
912	2865.13	6
913	2868.27	6
914	2871.42	6
915	2674.56	6
916	2677.70	6
917	2680.64	6
918	2885.98	6
919	2887.13	6
920	2690.27	6
921	2693.41	6
922	2896.55	6
923	2899.69	6
924	2902.63	6
925	2905.98	6
926	2909.12	6
927	2912.26	6
928	2915.40	6
929	2918.34	6
930	2921.68	6
931	2924.82	6
932	2927.97	6
933	2931.11	6
934	2934.25	6
935	2937.39	6
936	2940.53	6
937	2943.67	6
938	2946.82	6
939	2949.96	6
940	2953.10	6
941	2956.24	6
942	2959.38	6
943	2962.52	6
944	2965.67	6
945	2968.81	7
946	2971.95	7
947	2975.09	7
948	2978.23	7
949	2981.37	7
950	2984.52	7


Fig. 7
Charpente de plancher
Fig. 9
Fig. 10
Fig. 14
Fig. 16.
Fig. 17.
Fig. 18
Fig. 19
Fig. 20
Fig. 30.
Fig. 31
Fig. 32.
Fig. 33.
Fig. 34
Coupe des tuiles pannes
Plan



Nombres.	Circon-férence
901	2830.5
902	2833.7
903	2836.8
904	2840.0
903	2843.1
906	2846.2
907	2849.4
908	2852.5
909	2855.7
910	2858.8
911	2861.9
912	2865.1
913	2868.27
914	2871.43
915	2874.5
916	2877.7
917	2880.8
918	2883.9
919	2887.1
920	2890.2
921	2893.4
922	2896.5
923	2899.6
924	2902.8
925	2905.9
926	2909.1
927	2912.2
928	2915.4
929	2918.5
930	2921.6
931	2924.8
932	2927.9
933	2931.1
934	2934.2
933	2937.3
936	2940.5
937	2943.6
938	2946.8
939	2949.9
940	2953.1
941	2956.2
942	2959.3
943	2962.5
944	2965.6
945	2968.8
946	2971.9
947	2975.0
948	2978.2
949	2981.3
950	2984.5


B. 15. 3. 295
BNCF.